AGUAS SUBTERRÁNEAS
en El Bajo Cauca Antioqueño

Teresita Betancur Vargas

AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

Teresita Betancur Vargas.

Universidad de Antioquia – CORANTIOQUIA.

CORANTIOQUIA

Director General: Alejandro Gonzáles Valencia.

Subdirector de Calidad Ambiental: Juan D. Ramírez Soto.

Equipo Técnico: Gloria C. Araque Giraldo y Arbei Osorio Restrepo.

Oficina Asesora de Comunicaciones.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Rector: Alberto Uribe Correa.

Decano Facultad de Ingeniería: Carlos A. Palacio Tobón.

RECOPILACIÓN Y TEXTOS:

Teresita Betancur Vargas.

COLABORADORES DE EDICIÓN:

Orfely M. Rueda Gallo, Paola A. Palacio Buitrago y José A. Posada Marín.

ARCHIVO DE FOTOGRAFÍA:

Grupo GIGA – Universidad de Antioquia.

AGRADECIMIENTOS:

En el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Claudia P. Pineda González, Directora de Gestión Integral del Recurso Hídrico, y a Doris L. Otálvaro Hoyos.

En la Universidad de Antioquia: Miriam Benjumea Hernández, Cristina Martínez Uribe, Silvana Bolaños Chavarría, Ángel J. Cardona Pérez, Jhon C. Duque Duque, Juliana Ossa Valencia, Daniel A. García Giraldo, Laura Pineda Zapata, Diana P. Cárdenas Quintero, John F. Escobar Martínez, Gustavo A, Cruz, egresados de pre y posgrado de la Universidad de Antioquia que realizaron proyectos de investigación en El Bajo Cauca antioqueño.

A Luis Ribeiro del IST de Lisboa, Coordinador CYTED Red AQUIFERURAL.

A la comunidad de esta subregión.

ISBN: 978-958-8848-84-6

Diseño y producción:

Punto Tres.

Tiraje: 500 Unidades

Permitida la reproducción total o parcial de esta publicación con fines pedagógicos, citando la fuente.

Publicación elaborada en papel propalmate 150 gr.

Distribución gratuita.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 9

2. CONTEXTO GEOGRÁFICO 15

3. PERCEPCIÓN DE LOS POBLADORES DE EL BAJO CAUCA RESPECTO AL AGUA SUBTERRÁNEA 25

4. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO: PERSPECTIVA HIDROGEOLÓGICA 33

4.1 APROXIMACIÓN CONCEPTUAL A LA HIDROGEOLOGÍA 34

4.1.1 El ciclo hidrológico 34

4.1.2 El ciclo de las rocas 40

4.1.3 El ámbito de la Hidrogeología 43

4.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO. 50

4.2.1 Unidades hidrogeológicas 51

4.2.2 Áreas de recarga 52

4.2.3 Flujo de las aguas subterráneas: tránsito y descarga 55

4.2.4 Propiedades hidráulicas del Acuífero Libre de El Bajo Cauca. 55

4.2.5 Calidad del agua subterránea 56

4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 57

4.4 DISPONIBILIDAD Y NECESIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO 57

5. RIESGOS ASOCIADOS AL AGUA SUBTERRÁNEA 61

5.1 RIESGO POR CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA 62
5.1.1 Vulnerabilidad intrínseca 63
5.1.2 Carga contaminante 65
5.1.3 Peligro 70
5.1.4 Vulnerabilidad humana 73
5.1.5 Riesgo crítico por contaminación del agua 78
5.2 RIESGO POR DESABASTECIMIENTO Y RIESGO POR CAMBIO AMBIENTAL 80
5.2.1 Amenazas por desabastecimiento 80
5.2.2 Amenazas por cambio ambiental 81

6. EL FUTURO DE UN RECURSO INVISIBLE 83

7. BIBLIOGRAFÍA 93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proyección poblacional de la subregión de El Bajo Cauca por municipio al 2013. 20
Tabla 2. Población censada por grupo étnico. 20
Tabla 3. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Desarrollo urbano. 65
Tabla 4. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Actividad agrícola. 67
Tabla 5. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Actividad pecuaria. 68
Tabla 6. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Actividad minera. 69
Tabla 7. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Accidentes ambientales. 70
Tabla 8. El futuro de la Planeación para el Manejo del Acuífero en El Bajo Cauca. 90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio. 16
Figura 2. Modelo Digital de Elevación para El Bajo Cauca antioqueño y la zona de estudio. 17
Figura 3. Serie de fotos con geoformas de la región. 18
Figura 4. Ciénaga Colombia y escenas de diversidad biológica en los humedales de El Bajo Cauca. 19
Figura 5. Minería de oro en El Bajo Cauca antioqueño. 20
Figura 6. Transporte de madera por el río Man. 21
Figura 7. Abastecimiento de agua en las comunidades rurales de El Bajo Cauca antioqueño. 21
Figura 8. Pobladores de la región de El Bajo Cauca. 22
Figura 9. Distribución del agua en el planeta. 35
Figura 10. Ciclo del agua. 35
Figura 11. Representación del sistema hidrológico. 37
Figura 12. Cuenca hidrográfica. 37
Figura 13. Diagrama metodológico para el cálculo de la recarga mediante balance hídrico. 41
Figura 14. Descripción del ciclo de las rocas. 42
Figura 15. Metodología para la exploración hidrogeológica y construcción de un modelo hidrogeológico conceptual. 45
Figura 16. Diagrama conceptual para la identificación de zonas de recarga. 47
Figura 17. Esquema de áreas y fuentes de recarga, tránsito y descarga de agua subterránea. 48
Figura 18. Unidades hidrogeológicas en El Bajo Cauca antioqueño. 52
Figura 19. Espesores del Acuífero Libre de El Bajo Cauca antioqueño. 53
Figura 20. Espesores del Acuitardo de El Bajo Cauca antioqueño. 53
Figura 21. Espesores del Acuífero Confinado Panzenú. 54
Figura 22. Áreas y fuentes de recarga. 54
Figura 23. Nivel freático en época de invierno. 55
Figura 24. Nivel freático en época de verano. 56
Figura 25. Distribución de los valores de conductividad hidráulica para la unidad hidrogeológica U123. 56
Figura 26. Diagrama para la evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea. 63
Figura 27. Vulnerabilidad intrínseca para el Acuífero de El Bajo Cauca antioqueño. 64
Figura 28. Peligro de contaminación del agua subterránea por actividades de desarrollo urbano. 70
Figura 29. Peligro de contaminación del agua subterránea por actividades agropecuarias. 71
Figura 30. Peligro de contaminación del agua subterránea por actividad minera. 72
Figura 31. Distribución espacial de la exposición en la zona de estudio. 74
Figura 32. Distribución espacial de la fragilidad socioeconómica en la zona de estudio. 75
Figura 33. Distribución espacial de la falta de resiliencia en la zona de estudio. 76
Figura 34. Distribución espacial de la vulnerabilidad humana en la zona de estudio. 77
Figura 35. Riesgo crítico de contaminación del agua subterránea en el Acuífero Libre de El Bajo Cauca antioqueño. 78
Figura 36. Ecosistemas acuáticos y su relación con el flujo de agua subterránea en el área de estudio. 79
Figura 37. Sistemas de flujo subterráneo básicos: local, intermedio y regional. 80
Figura 38. Mapa de actores del PMAA en El Bajo Cauca antioqueño. 86
Figura 39. Árbol de problemas asociados al sistema hidrogeológico de El Bajo Cauca antioqueño. 88
Figura 40. Árbol de objetivos asociados al sistema hidrogeológico de El Bajo Cauca antioqueño. 89

PRESENTACIÓN

La exploración hidrogeológica en Colombia tiene una historia de más de medio siglo; con la creación, en 1993, del Ministerio de Ambiente y las Corporaciones Autónomas Regionales con función de Autoridad Ambiental, la investigación en aguas subterráneas cobró fuerza; y a partir de 2010, con la promulgación de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, ha ganado más ímpetu. En una y otra latitud del territorio nacional han surgido una y más iniciativas para conocer y entender, y con ello para contar con modelos hidrogeológicos en regiones donde esté bien adquiere el carácter de recurso estratégico. La academia y la investigación, desde la Universidad han estado, como le corresponde, al orden del día para aportar y contribuir en la búsqueda de caminos y soluciones a las necesidades del país, del ambiente y del planeta.

El Bajo Cauca antioqueño es ante la mirada de cualquier espectador una región rica en agua, y ante un lector desprevenido, seguramente suena paradójico el mencionar el hecho de que el acceso a agua potable por parte de la población está en el límite del desabastecimiento. Y es que el río Cauca, con caudales de más de 1.200 m^3/s en Caucasia, ha recorrido al llegar a la región más de 1.000 Km de distancia recogiendo corrientes y productos incorporados a ellas por los millones de habitantes asentados en las vertientes de las cordilleras Central y Occidental de Los Andes de Colombia; y los ríos Nechí, Man y Cacerí, han lavado terrenos dedicados a la agricultura, la ganadería y la minería a lo largo de sus cauces y riberas. En El Bajo Cauca antioqueño la única fuente segura de agua para el abastecimiento actual es un acuífero libre de extensión regional, y la única fuente segura de agua hacia el futuro se alberga en el acuífero confinado Panzenú. ¿Cuánto y hasta donde esta situación es clara en el territorio?, la respuesta no es fácil, ni es única:

• Los habitantes de la planicie aluvial de El Bajo Cauca, a fuerza de costumbre, han aprendido a identificar la integralidad del ciclo hidrológico, perciben qué es el agua subterránea, asocian su presencia con la lluvia y distinguen alguna conexión con los ríos y las ciénagas.

• La Autoridad Ambiental, viene buscando desde hace más de una década un rumbo certero para hacer gestión integral del recurso hídrico y la sostenibilidad ambiental del acuífero y de los ecosistemas dependientes de él.

• Las administraciones municipales y las empresas prestadoras del servicio de acueducto y abastecimiento de agua potable, no han logrado concretar proyectos efectivos para el aprovechamiento del agua subterránea.

• La Universidad ha estado atenta -en el marco de su misión institucional- mediante la investigación para contribuir en la generación de nuevo conocimiento, y mediante la extensión social a participar en convenios de cooperación con el ánimo de contribuir en la búsqueda de soluciones a problemas regionales.

• Quienes realizan prácticas agrícolas y mineras saben que contaminan, se lamentan por ello y quieren encontrar o reencontrar formas “limpias” de actuar.

La necesidad de acceder a agua segura es profundamente sentida por los habitantes de El Bajo Cauca, esta necesidad los motiva a acudir cuando se les convoca y a esperar –con o sin esperanza- respuestas institucionales, esta necesidad, puede motivar un cambio, puede transformarse en conciencia si se transmite el conocimiento, si se educa y si se construyen soluciones.

Tras más de 12 años de investigación, abarcando diferentes aspectos que tienen que ver con el agua subterránea en la subregión de El Bajo Cauca antioqueño, se entrega, a la comunidad y a los actores claves para la sostenibilidad de este bien natural, esta monografía en la que se reúne y sintetiza el conocimiento que a la fecha se ha sistematizado a partir de proyectos realizados por la Universidad de Antioquia y la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia –CORANTIOQUIA-. Seis convenios de cooperación interinstitucional y más de diez investigaciones de posgrado, han abordado aspectos hidrogeológicos, interacción entre aguas superficiales y subterráneas, análisis de riesgo, gestión integral de recursos hídricos, hidrodinámica de ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.

Coincide la edición de este documento con la culminación de un proyecto en el cual se formuló, mediante una metodología participativa, el Plan de Manejo Ambiental de Acuífero para El Bajo Cauca antioqueño. En él se han formulado 27 nuevos proyectos, cuya ejecución será necesaria, para procurar en un escenario de planeación a 10 años, avanzar en el cumplimiento de un objetivo: **“Garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo de la Dirección Territorial Panzenú mediante una gestión integral, que incluya los ecosistemas naturales y comunidades sociales asociados al mismo”.**

Alejandro González Valencia
CORANTIOQUIA
Director

Alberto Uribe Correa
Universidad de Antioquia
Rector

INTRODUCCIÓN

1

El agua es la sustancia más abundante que hay en la tierra, es el principal constituyente de los seres vivos, es un elemento modelador del paisaje, es un factor condicionante del clima. El agua circula en un continuo movimiento entre la atmósfera, el suelo, la superficie de la tierra, los mares, los lagos, los ríos, la litósfera y los seres vivos.

A través de la lluvia, observando en el paisaje corrientes y lagunas, viendo las nubes, la presencia de agua es evidente a los ojos. El verdor de un bosque, la fertilidad de un cultivo, la brizna de hierba que brota de una piedra, la migración de aves, la presencia de insectos, insinúan que en cualquier ambiente natural hay agua. Los desiertos nos insinúan sequía, los oasis nos recuerdan el milagro del líquido aflorando de la nada, un pozo nos hace mirar hacia adentro y descubrir bajo nuestros pies la presencia de ese bien invisible: el agua subterránea.

El agua subterránea es la porción de agua lluvia que primero se infiltra a través de la superficie del terreno alcanzando las capas de suelo; para luego percolar, almacenarse y fluir a través de las formaciones geológicas que tienen condiciones adecuadas de porosidad y permeabilidad. Según la magnitud de los volúmenes de agua en las rocas o depósitos sedimentarios, y dependiendo de las características de flujo en estos medios, se tendrán unidades hidrogeológicas denominadas acuíferos (llevan agua), acuitardos (retardan el flujo de agua), acuicludos (encierran el agua) o acuífugos (no retienen el agua).

Las aguas subterráneas representan aproximadamente el 30% del agua dulce total del planeta, y si se descuentan los casquetes polares y los hielos glaciares, ellas constituyen más del 95% del agua dulce y líquida, magnitud que representa una cifra considerable comparada con el agua de los ríos que suma aproximadamente 0,006% del total (Shimanko, 1997). En todos los ámbitos de la discusión en torno al ambiente sale a relucir la “apocalíptica” sentencia de la “crisis del agua”, siendo aún sus causas y efectos objeto de debate y especulación. La preocupación en torno a este aspecto no puede descuidarse porque el agua es un bien vital para el hombre y para todas las especies que habitamos la Tierra. Esto y las relaciones de abundancia y distribución han llevado a que se incremente el interés por el estudio del agua subterránea.

El uso, la conservación, la recuperación, la administración y la gestión del agua, tienen que soportarse en el entendimiento y en el conocimiento de los sistemas hidrológicos. La investigación es el camino que posibilita el cumplir con estos propósitos.

La exploración hidrogeológica en Colombia tiene una historia de más de medio siglo; con la creación, en 1993, del Ministerio de Ambiente y las Corporaciones Autónomas Regionales con función de Autoridad Ambiental, la investigación en aguas subterráneas cobró fuerza; y a partir de 2010, con la promulgación de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, ha ganado más ímpetu. En una y otra latitud del territorio nacional han surgido una y más iniciativas para conocer y entender, y con ello para contar con modelos hidrogeológicos en regiones donde este bien adquiere el carácter de recurso estratégico. La academia y la investigación, desde la Universidad han estado, como le corresponde, al orden del día para aportar y contribuir en la búsqueda de caminos y soluciones a las necesidades del país, del ambiente y del planeta.

En 2003, La Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia –CORANTIOQUIA- y la Universidad de Antioquia, dieron inicio al desarrollo de tres proyectos, resultado de los cuales se obtuvo un modelo hidrogeológico conceptual para la zona donde la dependencia al agua subterránea es casi exclusiva, en El Bajo Cauca antioqueño, luego se dio un primer paso hacia la validación de este modelo mediante la aplicación de técnicas isotópicas. A partir de entonces y hasta la fecha, la Universidad ha mantenido su condición de investigadora en la zona; con el trabajo de Betancur (2008) se consolido a escala regional, un modelo conceptual validado con hidrogeoquímica e hidrología isotópica, se calibró un modelo numérico de flujo y se alcanzó la evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas. Mediante convenio de la Universidad de Antioquia con la Agencia Internacional de Energía Atómica (Betancur, et al., 2010), se lograron adelantar importantes iniciativas –sin precedentes a nivel nacional- para evaluar la relación agua subterránea-humedales a escala de microcuenca en El Bajo Cauca (Santa, 2010 y Montoya, 2010).

Ha sido El Bajo Cauca, un laboratorio natural, en el cual desde la Universidad, se han propuesto y aplicado nuevas metodologías para la evaluación del Índice de Carga Contaminante en Acuíferos (Montoya y Gaviria, 2011) y riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Gaviria, 2010). En la cuenca del río Man, la Universidad ha indagado por la relación agua superficial-agua subterránea mediante intentos por encontrar el camino para formular modelos hidrológicos integrados (Gómez, 2010 y Palacio, 2014). El reencuentro Universidad - Corporación en 2010, hizo de El Bajo Cauca antioqueño una zona piloto para el ajuste y aplicación de las metodologías de Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuífero, ejercicio que se adelantó a la regulación requerida con el Decreto 1640 de 2012. Luego entre 2013 y 2014, con la participación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, CORANTIOQUIA y la Universidad de Antioquia completan el Plan de Manejo Ambiental de Acuífero, y dentro de él se concreta una gran iniciativa: la de publicar un documento que recoja y divulgue el conocimiento que a la fecha se tiene del sistema hidrogeológico regional, ese documento es este texto que a manera de monografía, recorre los estudios y resume lo que hoy se sabe sobre las aguas subterráneas en este territorio. Se ha aprendido, pero como suele ser la realidad del conocimiento, cada día sentimos que ignoramos más.

Los resultados que se recogen en este informe, dan cuenta de esta historia de exploración e investigación sobre el agua subterránea en El Bajo Cauca. El documento está organizado en cinco capítulos, inspirado en la idea de llevar al lector a través de una secuencia de contenidos que lo aproximen desde un marco conceptual inicial, hacia la hidrogeología de la región, yendo luego a la identificación de problemas o amenazas sobre las aguas subterráneas y concluyendo en un abanico de proyectos, con los que -pensando hacia el futuro- se pretende garantizar la sostenibilidad del agua para brindar este bien a las poblaciones futuras.

Luego de esta introducción inicial, en el capítulo dos se presenta un contexto geográfico de El Bajo Cauca antioqueño, describiendo brevemente las características físicas y poblacionales de la región.Reconociendo la importancia de valorar todos los saberes y conocimientos, en el capítulo tres se recoge la percepción que los pobladores del territorio tienen acerca de las aguas subterráneas.

Luego en la primera parte del capítulo cuatro, se exponen unas bases conceptuales generales sobre geología, hidrología e hidrogeología, con el fin de plasmar y entregar al lector un lenguaje básico común para abordar la lectura del resultado de los estudios sobre aguas subterráneas en El Bajo Cauca antioqueño. Ya entrando en materia, en el numeral 4.2 se describe el modelo hidrogeológico, se identifican los acuíferos y demás unidades hidrogeológicas y las características de ellos. Un apartado 4.3 hace referencia a la validación del modelo hidrogeológico, mediante la utilización de métodos hidrogeoquímicos e isotópicos. En el numeral 4.4 se recogen algunos elementos cuantitativos preliminares –lo que se conoce a la fecha- sobre disponibilidad y necesidad de agua subterránea en la jurisdicción de la Dirección Territorial Panzenú, como una introducción a lo que a futuro deberá materializarse en un estudio de oferta y demanda.

La Gestión del Riesgo, hace parte de la Gestión Ambiental que deben hacer las Autoridades Ambientales, y para cumplir este propósito lo primero que debe hacerse es la evaluación del riegos: En torno a esta materia, hay un camino por recorrer y una ruta metodológica por trazar, en el capítulo cinco de esta monografía se presentan los resultados que a la fecha se tienen en este sentido. Se menciona como preámbulo la necesidad de concebir al menos tres riesgos en materia de agua subterránea: i) riesgo por contaminación, ii) riesgo por desabastecimiento, y iii) riesgo por procesos naturales. Los avances más significativos de los estudios a la fecha se tienen en el campo del riesgo por contaminación.

El estudio más reciente hecho sobre aguas subterráneas en El Bajo Cauca ha sido la formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero, partiendo de un diagnóstico que se resume en un reconocimiento de la problemática, pasando por un análisis de prospectiva, se llega a la definición de líneas estratégicas para la acción y con ellas a la definición de una serie de programas y a la formulación de un conjunto de 27 proyectos, que trazan –en un horizonte de 10 años- el camino a recorrer. El último y sexto capítulo de esta monografía tiene por título: El futuro de un recurso invisible.

CONTEXTO GEOGRÁFICO

2

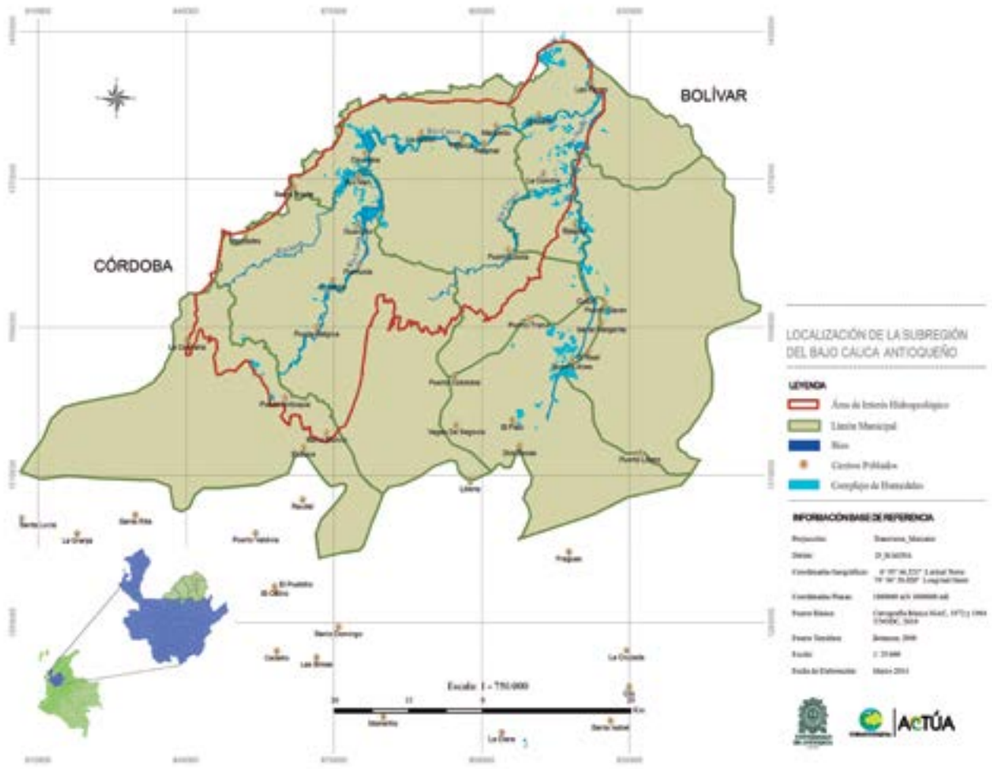


Figura 1. Localización de la zona de estudio.
Fuente: CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia, 2011.

Con una extensión de 8.485 km^2, la región de El Bajo Cauca antioqueño está localizada al norte del Departamento de Antioquia, en las últimas estribaciones de las cordilleras Central y Occidental de los Andes colombianos, entre las coordenadas geográficas 1´400.000 y 1´300.000 Latitud Norte y 805.000 y 965.000 Longitud Oeste (Figura 1), limita con los departamentos de Sucre, Córdoba y Bolívar; registra alturas entre 30 y 1.200 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), y está conformada por seis municipios ubicados sobre la cuenca baja del sistema fluvial Cauca-Nechí, los cuales son: Caucasia, Cáceres, Tarazá, Zaragoza, El Bagre y Nechí. Esta región es cruzada en sentido sur-norte hasta el municipio de Caucasia, y desde allí en dirección oeste-este hasta Nechí- por el río Cauca, una de las principales arterias fluviales del país (CORANTIOQUIA y Universidad de Antioqua, 2011).

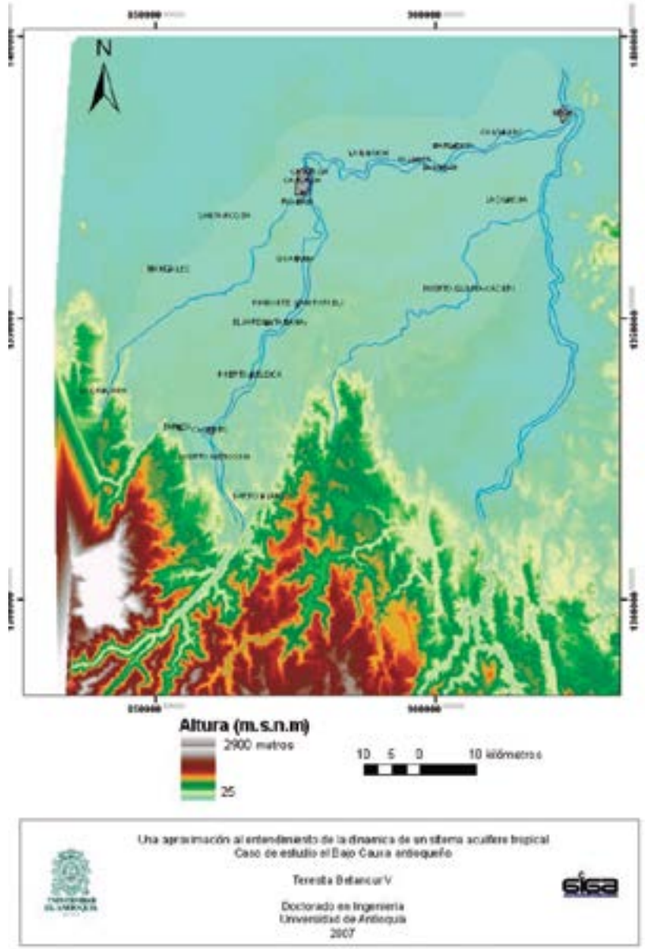


Figura 2. Modelo Digital de Elevación para El Bajo Cauca antioqueño y la zona de estudio.
Fuente: Betancur, 2008.

Después de descender desde el dominio montañoso de frentes erosivos de las cordilleras Occidental y Central -en Tarazá y Cáceres- el territorio de El Bajo Cauca se abre en una zona amplia, de topografía suave (Figura 2) con áreas planas y onduladas, correspondiente a las superficies de erosión Caucasia y Zaragoza-Cáceres y a las superficies aluviales de los ríos Cauca y Nechí.

En las fotos de la Figura 3, se ilustran algunas de las formas del paisaje más sobresalientes de la región. En el sector más alto, entre 250 y 1.400 m.s.n.m., se encuentran vertientes estructurales largas, onduladas o colinadas de incisión moderada, serranías y filos de topes estrechos subredondeados o bajos ramificados. Entre 150 y 300 m.s.n.m., se reconocen cerros aislados de vertientes irregulares y cuchillas estructurales de vertientes cortas. Otras de las manifestaciones más frecuentes del paisaje en la región, corresponden a parajes de superficie plana con leves ondulaciones e incisión insipiente, colinas bajas con topes amplios y redondeados cuyos flancos tienen pendientes entre 5° y 35° ; o colinas con apariencia baja y alargadas que delimitan valles en “v”. Dentro de las superficies aluviales, terrazas, valles, bajos y ciénagas, completan la geomorfología de El Bajo Cauca (Betancur, 2008).

Colinas bajas de topes redondeados

Colinas bajas de topes alargados

Llanuras aluviales

Llanuras aluviales

■ Figura 3. Serie de fotos con geoformas de la región.
Fuente: Grupo GIGA.

La localización tropical de la planicie de El Bajo Cauca antioqueño donde se ubica el sistema acuífero de la región, con alturas entre 50 y 200 m.s.n.m., y las condiciones climáticas con temperatura promedio anual de 27,8 ºC con variabilidad no superior a 1 ºC, precipitación promedio anual multianual de 2.800 mm, configuran un conjunto de circunstancias que imprimen a la zona un patrón climático homogéneo al que se le aplican denominaciones tales como tropical lluvioso de selva, cálido, húmedo, húmedo lluvioso o cálido húmedo. Sin embargo, la influencia que sobre algunas variables climatológicas puede llegar a tener la cercanía de las vertientes de las cordilleras Central y Occidental y del mar Caribe, hace necesario que la descripción de las condiciones climáticas de El Bajo Cauca trascienda la planicie aluvial del sistema Cauca-Nechí y se remonte vertiente arriba, comprendiendo inclusive regiones con climas templado y frío.

La planicie aluvial del territorio de Cáceres, Caucasia, El Bagre, Nechí, y Zaragoza, está bañada por los ríos Man, Cauca, Cacerí, Nechí y cientos de pequeños afluentes. En esta inmensa llanura, flanqueada por montañas, se forman numerosas ciénagas con una extensión de más de 40.000 ha, conectadas con los ríos mediante caños, formando complejos sistemas de lagos, pozas, pantanos y playones que retienen el agua de las crecientes y la liberan lentamente en el estiaje. Sin lugar a dudas una de las principales riquezas naturales de El Bajo Cauca la constituye este complejo sistema cenagoso que alberga una compleja diversidad biológica (Figura 4).

Los ecosistemas bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo premontano, caracterizan más del 80% de la subregión. Los municipios de Cáceres, Tarazá y Zaragoza hacen parte de la Reserva Natural Bajo Cauca-Nechí y su zona de amortiguamiento, mientras que los municipios de Cáceres, Caucasia, Nechí, Tarazá y Zaragoza pertenecen a la Reserva de los Recursos Naturales Zona Ribereña del río Cauca (Acuerdo N° 17, 1996), además, pequeñas porciones de los territorios de El Bagre, Nechí y Zaragoza se encuentran ubicados dentro de la reserva forestal del río Magdalena (Córdoba, 2011).

La población proyectada para 2013 -a partir del censo realizado por el DANE en 2005- corresponde a 287.279 habitantes, de estos el 60,0% habita en las cabeceras municipales y el 40,0% restante en áreas rurales (Tabla 1). En los municipios de El Bajo Cauca antioqueño además de los pobladores sin distinción étnica, se encuentran minorías de indígenas y negros, mulatos y afro (Tabla 2).

■ Figura 4. Ciénaga Colombia y escenas de diversidad biológica en los humedales de El Bajo Cauca.
Fuente: grupo GIGA.

Municipio	Población (número de habitantes)		
	Cabecera	Rural	Total
Cáceres	8.189	27.634	35.823
Caucasia	87.225	19.662	106.887
El Bagre	25.849	23.065	48.914
Nechí	13.367	11.944	25.311
Tarazá	24.702	15.653	40.355
Zaragoza	13.685	16.304	29.989
Total Bajo Cauca	173.017	114.262	287.279

Tabla 1. Proyección poblacional de la subregión de El Bajo Cauca por municipio al 2013.
Fuente: DANE, 2005.

Municipios	Población por grupo étnico (%)		
	Indígena	Negro, mulato, afrocolombiano o afrodescendiente	Ninguna
Caucasia	1,1	9,8	89,1
Cáceres	2,1	27,2	70,7
Tarazá	0,3	8,7	91,0
El Bagre	2,0	20,7	77,3
Nechí	0,3	35,6	64,1

Tabla 2. Población censada por grupo étnico.
Fuente: DANE, 2005.

Figura 5. Minería de oro en El Bajo Cauca antioqueño.
Fuente: Grupo GIGA.

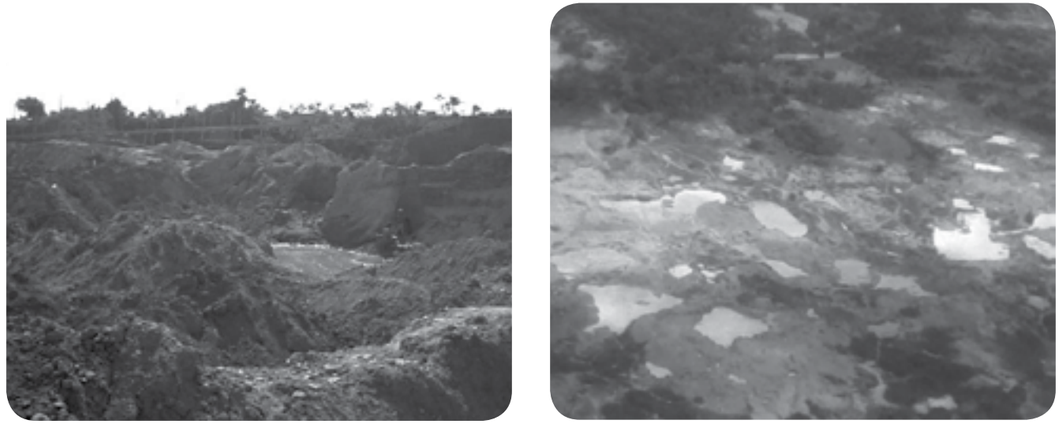


Figura 6. Transporte de madera por el río Man.
Fuente: Grupo GIGA.

Desde el punto de vista económico, El Bajo Cauca se ha destacado por sus actividades auríferas y ganaderas; también, se practican, a menor escala, la agricultura, la pesca y el comercio. La fiebre del oro existente desde la época de la conquista, se convirtió en una alternativa de desarrollo que no se supo aprovechar y que dejó a la zona en la extrema pobreza y en una situación ambiental crítica, hoy la subregión sigue siendo el primer productor de oro del departamento de Antioquia, y ante un nuevo auge de la minería, los conflictos sociales y ambientales vuelven a emerger en el territorio (Figura 5).

La ganadería que surgió como una alternativa económica es de carácter extensivo absorbiendo de esta manera poca mano de obra. Se le apunta al ganado de carne, pues las características de la zona la definen como área de mayor interés para dicha producción, llevándola a ser una de las más especializadas de todo el departamento.

La agricultura es una actividad de subsistencia, con un carácter de autoconsumo realizada en pequeñas parcelas con cultivos de maíz, arroz, yuca y plátano; esta actividad se combina con la pesca y la minería; en algunas áreas se ha desarrollado una agricultura comercial, con cultivos de arroz y sorgo. Gracias a la riqueza hídrica, la actividad pesquera es permanente y su producto se destina tanto al autoconsumo como al mercado local, además buena parte de los habitantes derivan su sustento del trabajo como transportadores en lanchas.

El potencial forestal de El Bajo Cauca es grande, sin embargo la explotación no se da en forma tecnificada (Figura 6), sino como resultado de la economía informal y de la expansión de la frontera agrícola en la subregión.

Caucasia ha sido históricamente el centro de servicios más importante en la subregión y establece comunicación con todos los demás municipios a través de la red vial conformada por la Troncal de la Paz y las vías Caucasia-Nechí y Zaragoza-Caucasia. Aun existiendo imponentes corrientes de agua superficial en El Bajo Cauca antioqueño como los ríos Cauca, Man, Nechí y Cacerí, las condiciones de abastecimiento del agua para satisfacer la demanda para consumo humano son muy precarias. La cobertura del servicio de acueducto es del 82,5% en Caucasia, 68,2% en El Bagre, 66,5% en Tarazá, 48% en Cáceres y 42,5% en Nechí. Res-

Figura 7. Abastecimiento de agua en las comunidades rurales de El Bajo Cauca antioqueño. Fuente: grupo GIGA.

pecto a la cobertura del servicio de alcantarillado se presentan coberturas del 2,2% en Nechí, 42,2% en El Bagre, 42,6% en Cáceres, 57,9% en Tarazá y 78,8% en Caucasia (DANE, 2005).

Explotándose de manera no planificada, el agua subterránea se ha constituido en la principal fuente de abastecimiento para satisfacer la necesidad de recurso hídrico que el Estado no proporciona. Desde más de 2.000 captaciones (pozos y aljibes) se extraen diariamente más de 26.000 m^3 del agua almacenada en los acuíferos de la subregión (Betancur, 2008).

Pese a los planes que a nivel estatal se han desarrollado para disminuir la población sin acceso a agua potable, a la fecha, en El Bajo Cauca, esta situación poco ha cambiado (Figura 7).

La cobertura de la educación básica primaria y secundaria en El Bajo Cauca, se ha visto afectada por problemas presupuestales, la movilidad de la población, la pobreza o desplazamiento interno, además del deterioro de las vías y del conflicto, éstos problemas han conducido muchas veces a la saturación del sistema en unos lugares o a la deserción masiva en otros. La tasa de analfabetismo es alta: 16,2% en Caucasia, 25,9% en Cáceres, 27,6% en Tarazá, 19,2% en El Bagre y 22,3% en Nechí. En cuanto a la educación superior, existen algunas entidades que ofrecen programas, en su mayoría técnicos y algunos profesionales, dando prioridad a las áreas agropecuarias y de formación docente, entre ellas están el SENA, el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, la Universidad de Antioquia, la Universidad de Córdoba y la Universidad Católica del Norte.

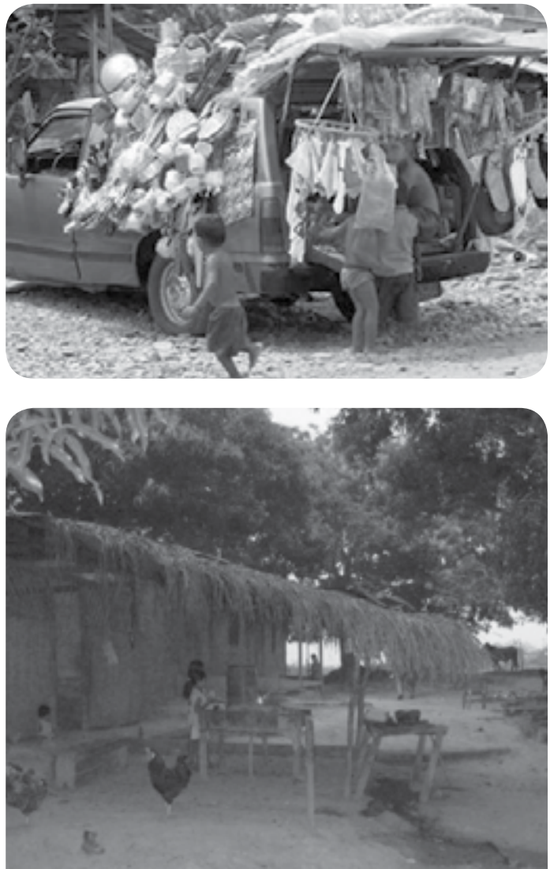
Según lo ha expuesto la Gobernación de Antioquia (Gobernación de Antioquia, 2009a), las condiciones de salud en El Bajo Cauca están altamente condicionadas por problemas ambientales y de saneamiento básico que multiplican los factores de mortalidad y morbilidad. Un elemento conexo a estas causas que inciden en la tasa de morbilidad en la subregión es la generalizada situación de pobreza y la miseria agravada por la explotación minera.

La evaluación del estado de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) en El Bajo Cauca registra que el 56,1% de la población vive en condiciones precarias por la falta de servicios públicos, deficientes condiciones de sus viviendas, hacinamiento y bajos ingresos. El municipio de El Bagre presenta el porcentaje más bajo con el 50,8% y Nechí presenta el más alto con el 68,1%.

El Índice de Condiciones de Vida (ICV) como indicador de carácter multidimensional que integra las variables: calidad de la vivienda como indicador de la riqueza física, acceso y calidad de los servicios públicos domiciliarios como medición de riqueza física colectiva, la educación como medida del capital humano individual, y tamaño y composición del hogar como capital social básico, presentó para El Bajo Cauca, en 2011, un valor del 55,1%, cuando se considera que por debajo del 70% es desfavorable. Nechí es el municipio que presenta el ICV más desfavorable con un 53,4%, mientras que Caucasia se encuentra en un 72,4%. Además la población en miseria alcanza el 75,5% frente al 52,5% en el departamento.

Siendo El Bajo Cauca la puerta de entrada a la Costa Atlántica, su cultura es una mezcla de costumbres antioqueñas y costeñas que hace que sus pobladores se caractericen por un carácter fiestero, alegre y trabajador. Y son justamente la amabilidad y la constante alegría lo que les permite sortear las dificultades y mantener el optimismo para emprender sus proyectos de vida (Figura 8).

Figura 8. Pobladores de la región de El Bajo Cauca. Fuente: Grupo GIGA.



PERCEPCIÓN
DE LOS POBLADORES DE EL BAJO CAUCA RESPECTO AL AGUA SUBTERRÁNEA

3

Esta monografía ha sido pensada y elaborada para llevar el conocimiento que se tiene sobre las aguas subterráneas en El Bajo Cauca a los habitantes de la subregión, por esa razón, de la mano de ellos se quiso indagar y describir acerca de la visión que tienen sobre ese bien natural.

Los pobladores de este espacio de la geografía colombiana han navegado por los ríos de su territorio, han sido pescadores, han sorteado las inclemencias de las inundaciones, en otra hora supieron convertir la adversidad en oportunidad y adaptarse a los vaivenes de las aguas para hacer más fértiles sus tierras, han reconocido y valorado la hermosa complejidad paisajística y biodiversa de sus ciénagas, extraen desde pozos y aljibes el bien que consumen y garantiza su supervivencia cada día.

Los términos hidrogeología o agua subterránea, dicen poco a la mayoría de los habitantes de la región. Aun cuando ella constituye casi su única fuente segura para el abastecimiento, frente a estos conceptos plasman imágenes de lluvia y de ríos, o quizás de un pozo. La convocatoria a la población de El Bajo Cauca a hacer visible este bien invisible, sólo vence la resistencia en la mente al momento de identificar amenazas y tratar de reconocer que hay acciones que pueden alterar la calidad del agua que beben, contaminándola y poniendo en riesgo la salud; también surgen inquietudes respecto al querer saber sobre el agua subterránea, los estudios que se han hecho, como participar en su protección y buscar apoyo del Estado.

¿Quiénes residen en este territorio? ¿Quiénes quieren entender el origen y la dinámica del agua subterránea? ¿Quiénes deben tomar decisiones técnicamente soportadas para garantizar la sostenibilidad de este bien?.

Durante el desarrollo de actividades participativas llevadas a cabo en 2010 y 2013, para la formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero en la subregión de El Bajo Cauca antioqueño, se identificaron –bajo la denominación de actores–, esos habitantes claves, llamados y destinados a pensar en un trayecto de su historia que tiene que ver con el agua, específicamente con el agua subterránea. Agrupados por sectores, entidades prestadoras de servicios públicos, productores, instituciones y comunidades, se reúnen voluntades y personajes que ven y sienten el agua subterránea.

Las empresas prestadoras del servicio de acueducto en la región enfrentan realidades diferentes en los distintos municipios; para el caso particular de Caucasia, la evidencia actual y la perspectiva futura de tener en el agua subterránea la única fuente segura de abastecimiento, es categórica. Complementando los caudales captados en el río Man, el agua que se extrae de algunos pozos se emplea para tratar de suplir las necesidades de los habitantes del municipio, y conocedores de las bondades hidrogeológicas de su territorio, han tocado –sin resultados contundentes– puertas en busca de apoyo del Estado para explorar el acuífero profundo.

Los operadores del servicio de aseo entienden que los lixiviados producidos en los sitios de disposición de basura pueden alcanzar el nivel freático y constituir así una fuente de contaminación puntual al acuífero; es claro en el sector, la necesidad urgente de contar con rellenos sanitarios eficientes para la región. Respecto a otra línea del saneamiento básico, la que tiene que ver con el servicio de alcantarillado, no parece estar en la mente de los operadores, o al menos al alcance de sus recursos económicos, el diseñar sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales, de cara al posible impacto negativo que estas pueden tener sobre el medio hidrogeológico, tanto sobre el acuífero como en sus zonas de recarga. Si se pregunta a un funcionario de alguna empresa de servicios públicos de la región, acerca de lo que conoce hoy sobre las aguas subterráneas en el territorio, diría: "*Para nosotros son muy importantes en estos momentos, porque no les estamos dando la importancia que esas aguas tienen; hay una falta de conocimiento de cómo funcionan, para qué sirven, cómo debemos cuidarlas, por lo tanto necesitamos más conocimiento para poder cuidarlas mejor y protegerlas, porque en estos momentos están siendo captadas de una manera inadecuada*."

Los agricultores, ganaderos, comerciantes e industriales, escasamente a nivel individual tienen una mínima sensibilidad por el agua del subsuelo. Hay quien ha manifestado "*No me interesan estudios, yo sólo sé que necesito agua*", ha sido posible escuchar "*yo no me intereso por el origen del agua, parto del hecho de que existe*". A lo largo y ancho del territorio es claro que no se concibe la relación de los humedales con el agua subterránea, peor aún, subsiste la idea de que los humedales son "pantanos que hay que secar" para aumentar la productividad de la tierra, y esa productividad a la que se hace referencia, se limita a más hectáreas para pastos destinados a la ganadería. Jair Becerra, de la balastrera Caracolí, sorprende y da una luz de esperanza cuando se refiere a la percepción que tiene del agua subterránea: "*Es un tesoro que yo no sabía que existía, es algo muy bonito que vale la pena cuidarlo, enterarse y convivirlo. Le digo que siento una alegría inmensa, estoy contento y tengo muchas ganas de aprender más con ustedes sobre esto. Es el mayor tesoro que tenemos aquí porque pensábamos que era el oro, pero no sabíamos que teníamos un tesoro más grande. Es que ese acuífero de 3.000 y pico de kilómetros ¡inmenso!, hermosísimo, hay que luchar por él, metérnoslo en la piel y trabajar por él, esa es la idea*". A nombre de los cacaoteros Jaime Enrique Jaimes manifiesta: "*Es casi la mitad de nuestras vidas porque sin el agua no podemos vivir, Dios nos da la vida, nos da el existir, pero tenemos que reconocer que parte de la creación de él es el agua, y es la que nosotros necesitamos a diario para poder sobrevivir, para poder utilizarla en todos nuestros que haceres, entonces creo que es importante porque aunque hayan métodos para extraerla, es más limpia la que se encuentra filtrada, lo cual hace que la utilicemos con más tranquilidad. Además nos sirve para preparar alimentos, para nuestra higiene, aseo, regar plantas, sirve para todo lo que tiene que ver a nuestro alrededor, así que creo que este recurso es muy importante porque hace parte de nuestra vida*".

Para **los mineros informales** el agua subterránea es un bien totalmente intangible, casi una idea esotérica. De manera tal vez inconsciente cuando la idea del agua subterránea llega a su mente, ella es identificada como un factor que limita sus posibilidades de avance en la extracción de oro, u otro bien del subsuelo. Frente a un cuestionamiento directo, un minero responde: "*Tengo poco conocimiento de cómo llega el agua hasta el pozo o aljibe. Por aquí el agua subterránea anda por todas esas montañas, los filtraderos que uno encuentra por ahí, los nacederos. Uno sabe que rompen, hacen la perforación y que encuentran el agua abajo pero uno no sabe de dónde puede venir o sea permanente, que por debajo el suelo tenga agua permanente en diferentes sitios o en todos los sitios del planeta. Pero como uno no tiene ese entendimiento de donde se produce, pero si se tiene ese entendimiento que en una parte baja uno hace una perforación a veces profunda, a veces llanita y filtra agua, y muchas veces hasta la gente la utiliza, porque cuando ya se asienta se pone clarítica, claro, no le echa uno nada, no sabe qué consecuencias le pueda dar, pero como no se encuentra una parte donde conseguirla más favorable, uno la utiliza*". La minería podría ser una fuente de desarrollo, pero la forma de practicarla la convierte en un

factor de riesgo, esta idea se trasluce en declaraciones como esta: "*Damos gracias a la minería porque ella permitió que se fundara la comunidad pero ahora se está viendo el perjuicio que tiene, hay enfermedades de tipo gástrico, estamos consumiendo agua contaminada*". Y no está ausente la preocupación en torno a la localización de captaciones de agua en relación con los frentes mineros: "*las aguas subterráneas están un poco más contaminadas por cuestión de la minería, ya que el 95% de la región está deteriorada y es de ahí donde hacemos pozos para el consumo. Hay sitios donde se hacen pozos para el consumo de toda la comunidad, más alejados de las zonas afectadas por minería. Sabemos igual que está contaminada por químicos de minería. Preguntan: ¿qué hacemos?. No hay ni acueducto, ni alcantarillado, hacemos letrinas. Las basuras las enterramos o las quemamos, vertemos al río los desechos y también en pozos grandes que ha dejado la mina*". Y conscientes de la necesidad de mantener las fuentes de agua en la región, sabedores de que su actividad puede afectarla y esperanzados en nuevas alternativas económicas para su subsistencia, desde la pequeña minería –hablando del agua subterránea– se reconoce que: "*Es un recurso, un tesoro invaluable y que depende de nosotros para su subsistencia, y que nosotros dependemos de él para la vida, a largo y mediano plazo. Participamos en los planes de manejo ambiental, con el propósito de concientizarnos y transmitir la información que tenemos a las demás personas, para que el agua subterránea sea tenida en cuenta como un tesoro que es lo que en realidad es*".

No ha sido posible captar la idea que desde **las administraciones municipales** se tiene en torno al agua subterránea; se quiere creer que allí, y particularmente dentro de algunas secretarías, hay sensibilidad por el tema, desalienta el hecho de sentirlos como los grandes ausentes en los procesos participativos convocados para la formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero. Quienes se refieren al tema han reconocido que la ignorancia conduce a los administradores a cometer errores, que finalmente traen como consecuencias impactos negativos que están afectando tanto el mismo hombre como el ambiente, de esta forma identifican acciones que afectan las aguas subterráneas: "*Los botaderos a cielo abierto, el deficiente estado de las redes de alcantarillado, la construcción de pozos sin planificar, la actividad minera y la deforestación*". Un representante de Mesas Ambientales manifiesta: "*Las aguas subterráneas son importantes porque de ellas depende nuestra calidad de vida, si hacemos un buen uso y aprovechamiento de este recurso hídrico subterráneo, en un futuro le vamos a dejar una mejor calidad de agua a nuestros hijos, por esto debemos contribuir al mejoramiento y buen uso que le podamos brindar a estas aguas subterráneas. Debemos de tratar de evitar la contaminación de muchas formas, contribuyendo a que esto no se siga dando en nuestros municipios y también haciendo parte de los procesos de gestión*".

Voceros del **sector de la salud** no dudan en resaltar la importancia del agua como condición fundamental para garantizar calidad de vida, entre ellos se escuchan declaraciones como estas: "*Es el recurso más importante porque es el de la vida, es indispensable, debemos quererlo, cuidarlo, conservarlo, tratarlo de la mejor manera, pensando no sólo en el día de hoy si no en el día de mañana para las futuras generaciones. Es un recurso que llegará un momento en el que va a ser escaso si no lo cuidamos*". "*Es lo más importante que tenemos junto con los humedales que son la vida de acá de El Bajo Cauca. Tenemos que hacer algo hoy para que nuestros hijos tengan esta fuente de vida en el futuro, y si lo acabamos. ¿Qué vamos a hacer el día de mañana?, es importante cuidarla, recuperarla y no acabarla*".

Desde **la Dirección Territorial Panzenú de CORANTIOQUIA** se es consciente de la necesidad (dada la carencia) de fortalecer la capacidad técnica de sus funcionarios en materia de agua subterránea, en la mente de todos está claro que el conocimiento es necesario para la acertada gestión, no obstante la voluntad se diluye en el mar de responsabilidades del día a día y la materialización de la realidad de comprender el sistema hidrogeológico se desvanece una y otra vez.

Después de tantos años de estudio, en la Dirección Territorial Panzenú hoy se manifiesta que: "*Se sabe que las aguas subterráneas, son aquellas aguas que están almacenadas en el subsuelo y la importancia para nosotros es alta, dado que El Bajo Cauca tiene el acuífero más grande de la jurisdicción. Tenemos un interés muy marcado por el desarrollo de la actividad minera, ya que tenemos altos grados de contaminación y a partir del Plan de Manejo buscamos encaminar acciones con actores estratégicos, para tratar de implementar una cultura más correcta y hacer un manejo adecuado de este recurso, que puede tener unas consideraciones favorables para el territorio. Por esto queremos que no existan riesgos por el desconocimiento de la estructuración del mismo, si no por el contrario, interesarnos por conocerlo y por emprender acciones para potenciar, su uso de manera responsable con el Medio Ambiente*".

Consciente de la importancia del recurso hidrogeológico, el representante de la **Policía Ambiental** manifiesta: "*Son las distintas aguas que se encuentran en la superficie y que a través de la tierra se filtran y hacen una acumulación dentro de ella. Para El Bajo Cauca es una riqueza invaluable porque es uno de los más grandes suministros de agua para muchas familias y fincas, siendo muy necesaria para el uso diario*".

La Universidad de Antioquia en su sede regional, ha tenido las puertas abiertas y los canales de comunicación atentos para servir de multiplicadores y difusores de conocimiento, actividades, jornadas de sensibilización y trabajo en materia de agua subterránea.

El entusiasmo y la "sed" por aprender, brota en la mirada de **los maestros,** la vocación por querer enseñar a cuidar el pozo, la zona de recarga y al agua toda, se ve en su actitud y compromiso. Se manifiesta el interés por fortalecer los PRAES en materia ambiental y específicamente en aspectos relacionados con el agua como bien y como patrimonio. Una maestra, vocera del gremio, trata de recoger el sentir del sector y expresarlo a través de sus palabras: "*Son capas de agua subterránea que se llaman acuíferos y estos son los encargados de alojar ese recurso hídrico subterráneo. Para El Bajo Cauca es importante, ya que nosotros en un 80% utilizamos pozos para recoger el agua que diariamente gastamos en la casa. Es importante porque si se nos agota quedaríamos prácticamente sin vida, entonces hay que cuidarlo. ¿Cómo?, poniendo sentido de pertenencia como persona, en las instituciones educando al niño, inclusive hay que dar cátedras para sensibilizar a la comunidad con el objetivo de que cuiden ese recurso hídrico, para que no desperdicien el agua, para que no contaminen el suelo y para que no halla quema, ni tala de árboles*".

Y a los ojos de todos, de **la comunidad** que vive en el territorio, los interrogantes se multiplican y la búsqueda de respuestas tiene más, o menos eco. "*Sabemos mucho de cómo protegerla, lo sabemos, pero de ahí a cumplir y a ponerlo en práctica hay mucho espacio; es poco lo que ponemos en práctica y sé también que como no nos genera recursos económicos no la cuidamos, ni la valoramos. No practicamos nada por el cuidado de las aguas, pero si deberíamos tener más cuidado, ¿por qué no practicamos?, porque no hay la consciencia ambiental por parte de la comunidad, no tenemos el Estado al frente, por eso somos desordenados*". Son muchos los aljibes abandonados que se convierten en depósitos de basura. "*Como individuo, como actor, afectamos el agua subterránea con la minería, el mercurio, arrojando basura, todo lo que el hombre hace, que uno nunca hace las cosas buenas sino lo malo, le tiramos la porquería al vecino a diario, eso ocurre en la parte de consciencia. Estamos afectados pero aún no lo sabemos. Hay desconocimiento de si la estamos o no dañando. Hace 32 años atrás, había estado de emergencia. Se sigue haciendo lo mismo con más agresividad. Hace 20 años los acuíferos no estaban contaminados por coliformes, hoy sí.*" Algunos tienen la clara idea de que el agua subterránea es de mejor calidad que el agua superficial: "la que estamos tomando limpia está por debajo". También capta la comunidad cual es el deber de El Estado y la necesidad de emprender acciones para la protección del agua subterránea: "*Es necesario trascender la*

parte técnica y económica, ahora se requiere saber cómo manejar el agua, pedimos apoyo de CORANTIOQUIA". Se escuchan consideraciones acerca de que el tema requiere estudios especializados y hay suposiciones de que el agua subterránea está contaminada: "*El agua subterránea es tema de expertos, algo que no sé; cada día más contaminada por químicos, ganadería y basura*". Algunas personas traslucen conocimientos técnicos respecto a este recurso hídrico: "*Es importante proteger las zonas de recarga, es necesario la recuperación de suelos y vegetación, es imprescindible el control por parte de la autoridad ambiental para la explotación del acuífero, hay interacción entre el agua superficial y el agua subterránea, por lo tanto se requieren cuerpos de agua descontaminados y con óptimas condiciones de vida*".

Reconociendo la importancia del agua subterránea en su comunidad expresan frente a la protección: "*estamos tratando de cuidar las aguas subterráneas, con esa es que nos vamos a seguir alimentando. Cuidamos los nacederos, los acuíferos*". Están receptivos a la participación en el manejo del agua subterránea: "*estamos interesados en la capacitación, de pronto sale un proyecto con la comunidad. Queremos el apoyo del gobierno, de CORANTIOQUIA*".

La misión de administrar los recursos naturales en 80 municipios de Antioquia es de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, presente en El Bajo Cauca antioqueño como Dirección Territorial Panzenú.

CORANTIOQUIA desde el año 2002 ha promovido la realización de estudios de exploraciones hidrogeológicas en la región de El Bajo Cauca, a partir de los cuales se han construido modelos hidrogeológicos conceptuales del sistema acuífero existente, obteniendo una interpretación de los componentes y procesos que intervienen en este sistema hidrogeológico de la subregión, también se ha establecido que el recurso hídrico subterráneo además de ser estratégico, es de alta demanda, abasteciendo las necesidades de gran parte de la población para su consumo doméstico y para el desarrollo de las actividades económicas de la región. Por lo tanto, las aguas subterráneas constituyen una de las principales fuentes de abastecimiento de agua, aunque las condiciones del acuífero y el uso del suelo imprimen condiciones significativas de alta vulnerabilidad y riesgo a la contaminación del agua subterránea.

La Universidad de Antioquia mediante numerosos proyectos de investigación ha avanzado en la validación de modelos hidrogeológicos conceptuales, ha incursionado en el entendimiento de la relación entre agua superficial y agua subterránea en la región y ha descrito la importancia que para la supervivencia de los humedales de la región tienen las aguas freáticas.

El título y la temática anunciada para este capítulo del documento, permitirían abordar varios aspectos de interés en términos de responsabilidad y el deber ser, pero la pretensión es la de leer –como se anunció en los primeros párrafos– la percepción del agua subterránea desde adentro de quienes viven, sienten y sufren el territorio. Por esto a manera de cierre solo se reseña un punto final: La Constitución Política de Colombia (Presidencia de la República, 2008) concibe como entidad fundamental de la organización territorial del Estado al municipio; a éste le corresponde por Ley prestar los servicios públicos, realizar las obras que demande el progreso local, ordenar el desarrollo de su territorio, promover la participación comunitaria y el mejoramiento social y cultural de sus habitantes. El Estado es quien garantiza el derecho a un ambiente sano y como condición para ello se requiere del acceso a agua potable para la población.

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO: PERSPECTIVA HIDROGEOLÓGICA

4

4.1 APROXIMACIÓN CONCEPTUAL A LA HIDROGEOLOGÍA

Hidrología-Geología: Agua-Tierra. El Agua es la sustancia más abundante en la Tierra, es el principal constituyente de los seres vivos, es una fuerza importante que continuamente está modelando el paisaje, es un factor clave en el clima. La Tierra es el hogar de millones de especies, incluyendo los seres humanos; su origen y evolución, su posición en el universo, los movimientos del macro y del microcosmos se han confabulado desde siempre para permitir que la vida surgiera y permanezca.

De acuerdo con el diccionario de la lengua española la morfología de la palabra hidrogeología está compuesta de tres partes etimológicas:

Hidro: del griego -δρο- Hydro, que significa 'agua'.
Geo: del griego -γεω-, Geo, que significa 'tierra' o 'la Tierra'.
Logía: Del griego -Λογος- Logos, que significa 'tratado', 'estudio', 'ciencia'.

Según dicho diccionario la hidrogeología es: "la parte de la geología que se ocupa del estudio de las aguas dulces, y en particular de las subterráneas, y de su aprovechamiento".

El punto de partida para abordar la hidrogeología está referenciado al encuentro entre dos ciencias: hidrología y geología. La hidrogeología se ocupa de estudiar el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones tanto con el medio físico como con el biológico, y sus reacciones ante la acción del hombre. También, hidrología y geología son ciencias de la tierra, que además de permitir entender los fenómenos que determinan la ocurrencia de agua en el subsuelo, tienen su asidero sobre un lugar y a través de la historia, por lo tanto requieren ser objeto de representación espacial y de evaluación y análisis a través del tiempo.

Los aspectos básicos acerca de la física de la atmósfera, el suelo e incluso la vida, pueden ser comprendidos mediante el estudio de la hidrósfera (del griego hydro: agua y sphaira: esfera). La hidrósfera describe en las Ciencias de la Tierra, el sistema físico constituido por el agua que se encuentra bajo y sobre la superficie de la Tierra: en la atmósfera, en el océano, en los ríos y lagos, en el suelo, la corteza terrestre y los seres vivos.

Hace más de 4.500 millones de años, durante la formación de la Tierra, las altas temperaturas mantenían el agua en forma de vapor. Cuando la tierra comenzó a enfriarse por debajo del punto de ebullición del agua, ocurrieron gigantescas precipitaciones que llenaron de agua las partes más bajas de la superficie formando los océanos. Así, la mayor proporción del agua que se encuentra en el planeta es la que forma parte de los mares donde está el agua salada. Mientras que la mayor proporción de agua dulce se encuentra como masas de hielo y agua subterránea y el resto del agua dulce fluye en estado líquido; en la atmósfera el agua está como vapor, como gotas o en cristales sólidos dispersa en el aire o en forma de nubes; en la biósfera el agua hace parte de plantas, animales y seres humanos (Figura 9).

4.1.1 El ciclo hidrológico

En la tierra el agua existe en un espacio llamado **hidrósfera**, que se extiende desde los quince kilómetros arriba en la atmósfera hasta un kilómetro por debajo de la litósfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrósfera dando lugar al Ciclo Hidrológico (o Ciclo del Agua): movimiento ininterrumpido del agua en todos sus estados, desde todos sus orígenes, hasta todos sus destinos; el ciclo del agua involucra dos factores de gran trascendencia: circulación -movimiento- y conservación -la cantidad de agua en el planeta permanece constante-. Tal como se representa en la Figura 10, se trata de un ciclo físico, químico y biológico en el que interviene la energía radiante que procede del sol y la gravitación universal, se dan reacciones químicas y se producen cambios de estado.

Figura 9. Distribución del agua en el planeta.

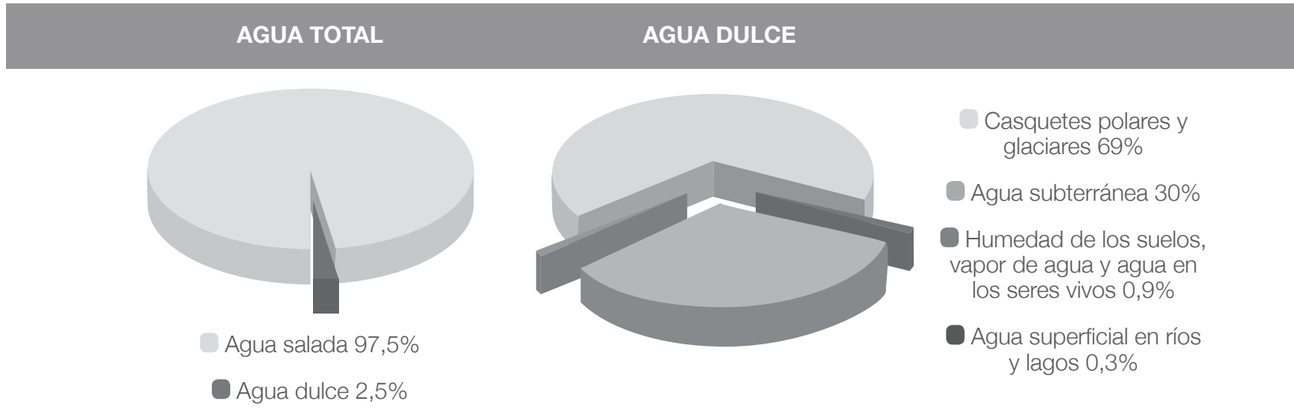
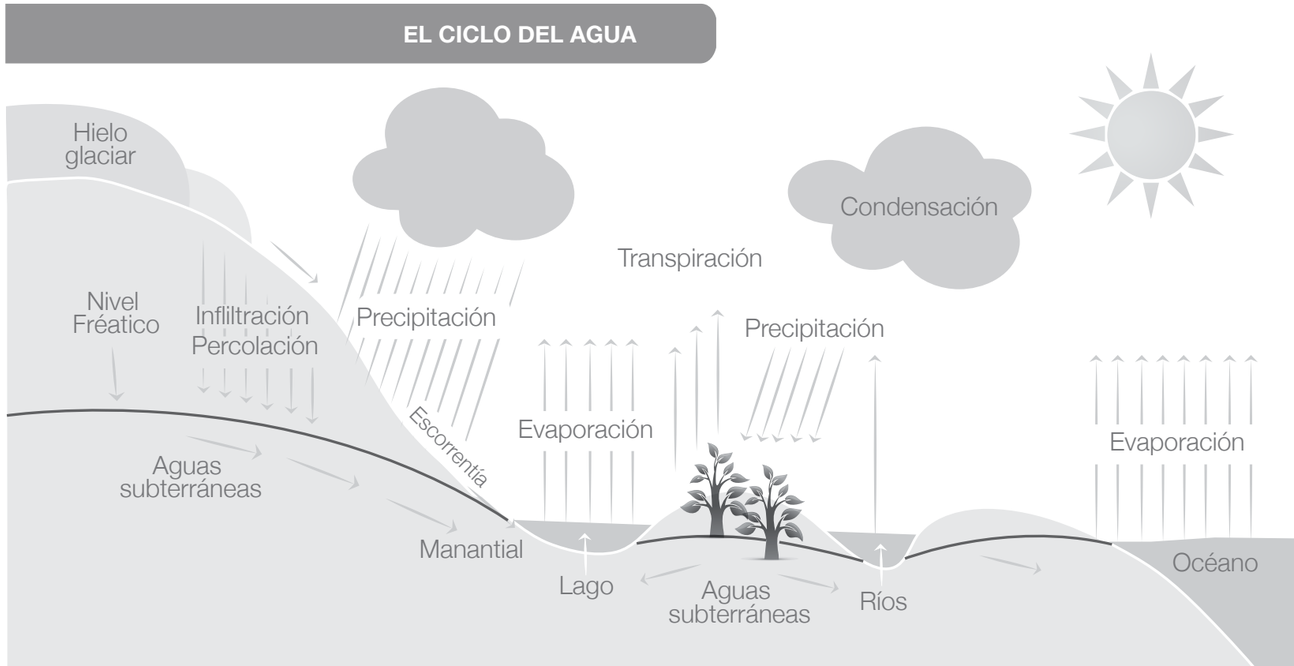

AGUA TOTAL
AGUA DULCE
Agua salada 97,5%
Agua dulce 2,5%
Casquetes polares y glaciares 69%
Agua subterránea 30%
Humedad de los suelos, vapor de agua y agua en los seres vivos 0,9%
Agua superficial en ríos y lagos 0,3%

Figura 10. Ciclo del agua. Fuente: USGS.



La energía del sol mantiene el ciclo en funcionamiento continuo, el agua se evapora (estado gaseoso) constantemente de los océanos, lagos, ríos y el suelo. El vapor acuoso que se forma, asciende a lo alto impulsado por las corrientes de aire que se elevan de la superficie terrestre, hacia los espacios donde la temperatura es más baja.

En presencia de corrientes de aire, según gradientes de presión, el vapor de agua se condensa en diminutas gotas y se hace visible en forma de nubes o niebla, que pueden ser transportadas por el viento hacia regiones muy alejadas. Las gotas se van haciendo más grandes y más pesadas a medida que la condensación aumenta, entonces el aire ya no puede sostenerlas y se precipitan en forma de lluvia (estado líquido), nieve o granizo (estado sólido).

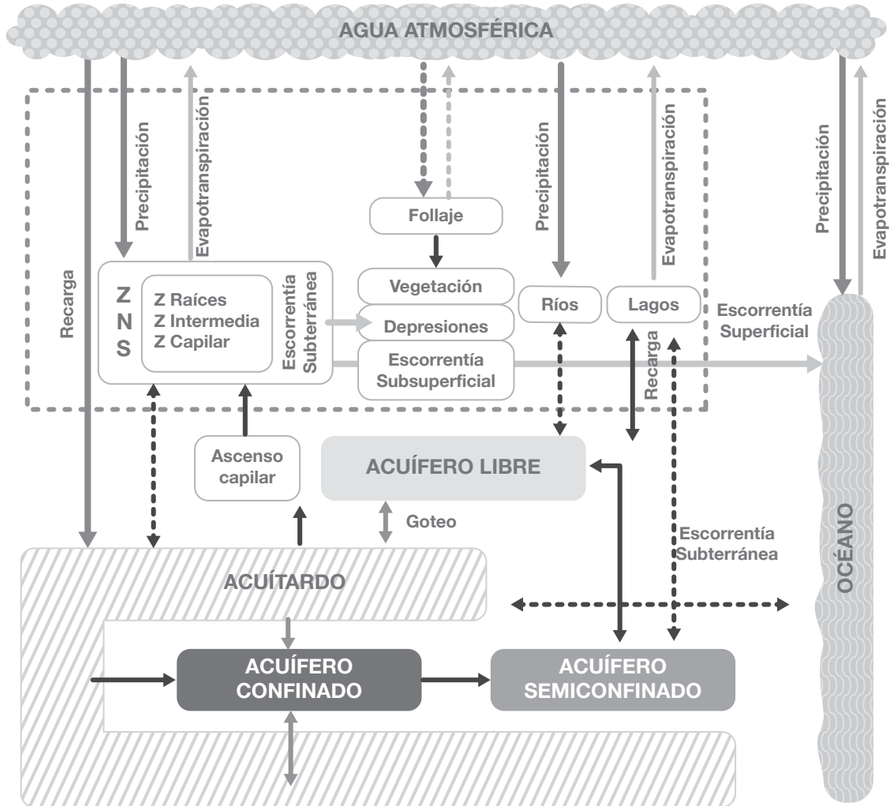
Si estas precipitaciones ocurren en latitudes polares o a gran altura, parte de las aguas van a formar los glaciares. Si las precipitaciones caen en el suelo, parte del agua corre por las pendientes y de acuerdo con la cantidad de vegetación, el tipo de suelo y a su declive, el destino del agua que proviene de las precipitaciones puede tomar distintos caminos: el agua se filtra a través del suelo desde donde es aprovechada por las plantas y devuelta a la atmósfera mediante la transpiración, o percola lentamente por acción de la gravedad hacia los niveles superiores de la corteza, donde se almacenan y circulan hasta de nuevo aflorar a la superficie en forma de manantiales; o el agua escurre superficialmente, formando arroyos y ríos que desembocan en el mar. Siempre el agua regresa a su origen.

Desde el punto de vista hidrológico, el ciclo natural del agua no puede ser entendido sin considerar su intervención por parte del hombre mediante la regulación de las aguas superficiales (embalses, captaciones, elevaciones) y explotación de las aguas subterráneas. Así, el balance hidrológico final no es ya sólo un resultado de procesos naturales, sino que han de considerarse las distintas formas de apropiación y consumo en las diferentes fases del ciclo. Pero no sólo el consumo directo sustrae importantes volúmenes de agua del ciclo natural, también existen otros mecanismos indirectos a través de los cuales la acción humana modifica los procesos naturales: la deforestación y la erosión, son aspectos que influyen en una menor capacidad de retención del agua y alteran los procesos de circulación; la contaminación modifica la composición físico-química del agua, lo que no sólo afecta a los procesos biológicos sino que llega a comprometer su propia reutilización.

Así se describa de manera sencilla y existan muchas formas para representarlo de manera pictórica, así la mente humana tenga la capacidad de rodar en su imaginación el ininterrumpido movimiento del agua, los fenómenos hidrológicos son sumamente complejos. Con diferentes niveles de conocimiento se elaboran modelos, entendidos estos como representaciones simplificadas de la realidad. Con visión integral, relacionando al agua y su función ecosistémica, los modelos se visualizan como sistemas. Un sistema -en su acepción más sencilla- es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo. El sistema es una estructura, mecanismo, esquema o procedimiento, real o abstracto, que relaciona en tiempo o espacio una causa, entrada o estímulo de materia, energía o información con un efecto, salida o respuesta de materia, energía o información. El ciclo hidrológico bajo la concepción sistémica, consta de un conjunto de componentes conectados mediante flujos como se muestra en la Figura 11. Los componentes se representan mediante los espacios físicos de la hidrósfera, en los que es posible almacenar o contener agua, y los flujos corresponden al movimiento del agua entre uno y otro componente.

Este documento no alcanzará a describir las características generales de esos espacios que constituyen la hidrósfera y a los que se denominan componentes del sistema hidrológico; de esta forma para no correr el riesgo de desviar la atención del propósito principal del texto, sólo se nombran. Los componentes básicos del sistema hidrológico son: la atmósfera (aire), la litósfera (suelo y corteza terrestre), la superficie (ríos, lagos y océanos) y la biósfera (los seres vivos). Acerca de los principales procesos (flujos) implicados en el ciclo del agua, si se hace una breve disertación.

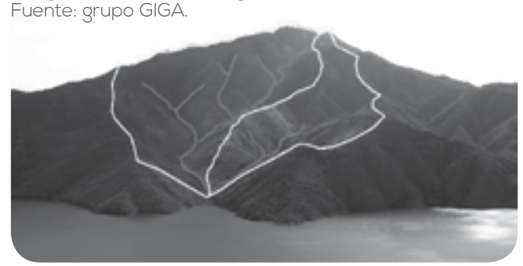
Figura 11. Representación del sistema hidrológico.
Fuente: Betancur, 2008.



Para continuar es necesario hacer algunas precisiones adicionales en relación con el espacio, el tiempo y la magnitud del ciclo del agua.

Generalmente, la comprensión del sistema hidrológico parte de la concepción del ciclo a escala global y a nivel de un área de terreno que drena agua en un punto común, es decir, a nivel de una cuenca hidrográfica. Es así, como en términos de espacio, es preciso enfatizar el hecho de que la naturaleza (y el ciclo hidrológico que hace parte de ella) no actúa según fronteras políticas, administrativas, o de propiedad privada definidas por el hombre, el ciclo el agua tiene una escala global (todo el planeta); y a nivel local en la búsqueda de su comprensión, debe hacerse al nivel de una cuenca. La cuenca hidrográfica es el área en la cual las aguas superficiales o subterráneas, con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, confluyen en un curso de agua mayor, que a su vez puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano, o directamente en el mar (Figura 12).

Figura 12. Cuenca hidrográfica.
Fuente: grupo GIGA.



La traslación que durante 365 días hace la tierra en su órbita alrededor del sol, da origen al año calendario y al año hidrológico, la repetición de este ciclo le imprime al clima y al agua, un patrón normal (promedio) de comportamiento que determina para cada territorio la existencia de épocas de lluvia o sequía y fenómenos de variabilidad que a veces dan lugar a situaciones atípicas. El conocimiento y la comprensión del ciclo hidrológico en un lugar determinado, se logran a partir de observaciones y mediciones realizadas a través del tiempo. Los parámetros que se miden tienen que ver con las características físicas de cada componente del sistema y con la cantidad de agua que se mueve entre ellos. Para estos propósitos deben existir estaciones con instrumentos adecuados y personas responsables de la toma de datos. A nivel internacional se ha establecido que las cantidades de agua que llueve, escurre o se evapora, se midan en unidades de longitud o volumen por unidad de tiempo.

4.1.1.1 Procesos -flujos- en el sistema -ciclo-hidrológico:

Desde el océano, el suelo y los cuerpos de agua hacia la atmósfera se da la evaporación, desde ésta hacia la tierra la precipitación, sobre ella la escorrentía, verticalmente hacia el suelo la infiltración, hacia los acuíferos la recarga (Lopez-Geta, Fornes, & Ramos, 2009). Estos son los procesos que mueven el agua en el ciclo hidrológico:

Evaporación: El vapor de agua, menos denso que el agua líquida, asciende a capas más altas de la atmósfera. La evaporación se define como el proceso físico, movido por la radiación solar, que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.

Evapotranspiración: Parte esencial del ciclo hidrológico está representada por la evaporación y por las cantidades de agua que en forma de vapor son devueltas a la atmósfera por los seres vivos, especialmente por la vegetación. Al proceso biológico mediante el cual se produce el cambio de estado que devuelve agua a la atmósfera se le denomina transpiración. La magnitud de este proceso está condicionada en cada lugar por características climáticas y por el tipo de cobertura vegetal. Normalmente esta variable no se mide y para su estimación se emplean diferentes relaciones experimentales desarrolladas por hidrólogos y ecólogos en diferentes latitudes. La dificultad de medir y separa las fuentes de vapor de agua que son devueltas a la atmósfera, ha llevado a que en términos prácticos se hable conjuntamente de los procesos físicos y biológicos responsables de este flujo y así se define la evapotranspiración.

Precipitación: Cuando por condensación las partículas de agua que forman las nubes alcanzan un tamaño superior a 0,1 mm se comienzan a formar gotas, las cuales caen por gravedad dando lugar a las precipitaciones (en forma de lluvia, granizo o nieve). La precipitación es el proceso físico, regido por la fuerza de gravedad, mediante el cual el agua procedente de la atmósfera, en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra.

Escorrentía superficial: Una parte del agua que precipita sobre la superficie fluye sobre ella hasta ser canalizada en corrientes o almacenada en cuerpos de agua como lagos, lagunas, charcos, o mares. La escorrentía superficial es el proceso físico, regido por la fuerza de gravedad, mediante el cual, el agua circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje hasta alcanzar una depresión o canal.

Infiltración: El agua que no escurre sobre el terreno, puede atravesar la superficie e incorporarse al suelo para satisfacer luego necesidades fisiológicas de la vegetación, fluir subsuperficialmente o penetrar la superficie del terreno a través de los poros y fisuras del suelo, los depósitos o las rocas y podría también llegar hasta niveles más profundos alcanzando el nivel de las aguas subterráneas. La infiltración se define como el proceso físico, que por efectos de la gravedad permite el movimiento del agua desde la superficie hasta los niveles superiores del suelo. Está condicionada por efectos de la pendiente y permeabilidad del terreno.

Escorrentía subsuperficial: Parte del agua infiltrada escurre lateralmente a través de los primeros horizontes del suelo por encima del nivel freático, hasta brotar en superficie o incorporarse eventualmente a los cauces superficiales de drenaje. La definición formal indica que la escorrentía subsuperficial es la diferencia entre el agua infiltrada y la retenida formando la humedad del suelo y la que alimenta a las reservas de agua subterránea. Esta escorrentía es más lenta que la superficial pero más rápida que la subterránea.

Percolación o recarga: Es un proceso físico con el cual, por efectos de fuerzas gravitatorias, parte del agua infiltrada alcanza niveles más profundos, atraviesa el nivel freático y causa recarga a los medios saturados.

Escorrentía subterránea: Por efectos de gradientes hidráulicos el agua percolada en los acuíferos, fluye desde zonas de mayor hacia áreas de menor potencial, este proceso constituye la escorrentía subterránea y con ella se configura el caudal base, que mantiene el nivel de las corrientes y cuerpos de agua en épocas de estiaje. Existen procesos experimentales para separar escorrentía directa y flujo base en corrientes. De otra parte mediante monitoreo de oscilaciones del nivel piezométrico se pueden obtener redes de flujo con las que se dibujan las rutas del agua en el subsuelo. La comprensión de las rutas que sigue la escorrentía subterránea es crucial para la identificación de áreas de recarga, zonas de tránsito y lugares de descarga, todo ello puede configurar en un territorio la presencia y ocurrencia de flujos locales, intermedios y regionales.

4.1.1.2 Balance hídrico:

El sistema hidrológico actual puede considerarse cerrado a escala planetaria, salvo algunas moléculas que pueden cruzar la alta atmósfera, la tierra no intercambia flujos de agua con el espacio exterior; la masa de agua en el planeta es constante.

El propósito central de la hidrología aplicada es el análisis para el entendimiento de la forma como ocurre el ciclo hidrológico en un sistema de referencia. Las cantidades de agua que circulan en la hidrósfera se relacionan entre sí, conforme al principio de conservación de masa, debiendo existir un equilibrio entre entradas y salidas. Las relaciones cuantitativas que representan este equilibrio constituyen el balance hídrico. En hidrogeología el objeto del balance se direcciona fundamentalmente a la evaluación de la recarga.

En términos generales, el cálculo de la recarga potencial directa se desarrolla a partir del método “balance de agua en el suelo”. En éste, el volumen de control es el suelo o la zona no saturada. En un balance a largo plazo, se considera a la precipitación (P) como el flujo de entrada principal, y como flujos de salida, la escorrentía (Es), la infiltración (I) y la evapotranspiración real (ET).

$$\Delta S = P - (Es + ET + I + R)$$

Donde, (ΔS) es el cambio en el almacenamiento en el suelo por unidad de tiempo. Cuando el volumen de infiltración supera la capacidad de almacenamiento del suelo, el agua fluye subsuperficialmente o se percola subterráneamente y produce la recarga (R). Todas las variables se expresan en unidades de longitud por unidad de tiempo (mm/mes o mm/año), según escala temporal de agregación.

Los datos de precipitación, escorrentía y evaporación real pueden, en teoría, ser obtenidos desde estaciones hidroclimatológicas, sin embargo la realidad hace que en la mayoría de los casos se requiera recurrir a aproximaciones teóricas para estimar una o más de estas variables. En el caso de El Bajo Cauca se aplicó el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para abstracciones conocido como método de Número de Curva (Chow V, et al, 1994) para obtener la Escorrentía superficial directa (Es), debido a la ausencia de datos de caudal en las zonas de estimación del balance. A partir de este procedimiento, se define un valor de número de curva de escorrentía por cada estación o para cada zona, en función de las características físicas de los suelos y de las condiciones de uso de la tierra. Los resultados obtenidos mediante este procedimiento poseen un nivel de in-

certidumbre inherente a la condición de haber sido estimados mediante un procedimiento teórico, en el cual se involucran coeficientes que fueron desarrollados para zonas de Estados Unidos diferentes a las condiciones tropicales de Colombia, además de la agregación del método a escala diaria.

La evaporación se mide en estaciones climatológicas o se estima el parámetro evapotranspiración mediante aproximaciones teóricas o empíricas. En El Bajo Cauca se usó la información disponible de tres estaciones que cuentan con tanque evaporímetro. De esta manera se asumió que las condiciones de evaporación en las zonas del balance son las mismas que las reportadas en dichas estaciones.

La infiltración potencial (I) se estima como la diferencia entre la precipitación (P) y la escorrentía (Es). El almacenamiento en el suelo varía entre el punto de marchitez permanente (pmp) y la capacidad de campo (cc). Respecto a la evapotranspiración real (ET), ésta se calcula en función de la evapotranspiración potencial (ETP) y las condiciones de humedad del suelo: si la humedad en el suelo, más la infiltración potencial, menos la evapotranspiración potencial, es mayor o igual al punto de marchitez permanente, la evapotranspiración real será equivalente a la evapotranspiración potencial; o ET es igual al almacenamiento en el suelo, más la infiltración, menos el punto de marchitez permanente, si la humedad en el suelo más la infiltración potencial diaria es menor a pmp.

Para hallar las condiciones de humedad del suelo (S_i) en un tiempo i, se estiman primero las condiciones de humedad en un tiempo inmediatamente anterior (S_{i-1}). La humedad del suelo se calcula como:

$$S_i = P_i + S_{(i-1)} - Es_i - Et_i$$

Si, S_i supera la capacidad de campo, entonces se produce recarga potencial directa y S_i será equivalente a la cc del suelo. El diagrama de flujo que describe la estimación de la recarga se presenta en la Figura 13.

4.1.2. El ciclo de las rocas

En principio la litósfera (del griego lito: piedra y σφα ρα: esfera), representaría el medio físico que puede albergar el agua subterránea, sin embargo las dimensiones en profundidad desde decenas a cientos de kilómetros de esta capa que envuelve al planeta tierra, incorpora dominios dentro de los cuales el flujo hídrico a escala del ciclo hidrológico pierde el significado y se estaría en el límite del ciclo hidrogeológico que puede involucrar dimensiones temporales de miles o millones de años.

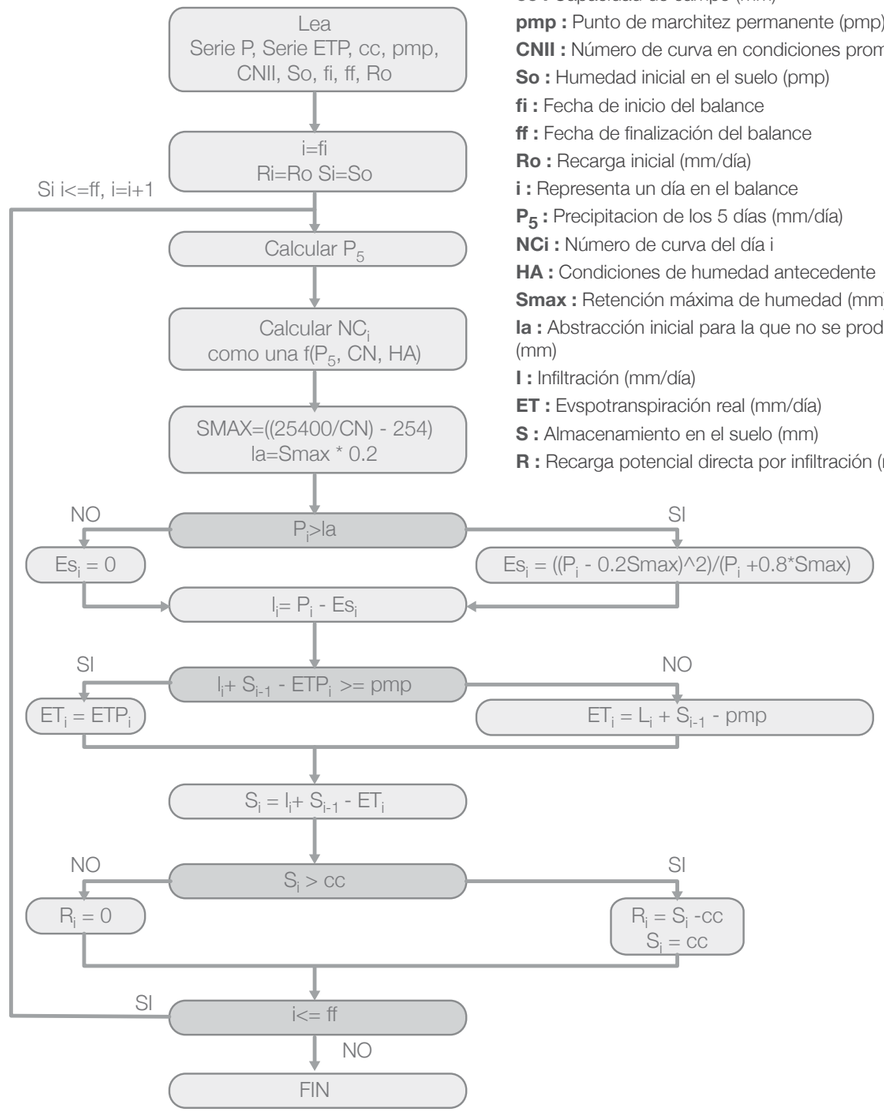
Considerando la idea de GAIA, la Tierra, como un todo, se concibe como un ser vivo sistémico, en el que los ciclos marcan el ritmo de su existencia. De esta manera el ciclo de las rocas permite comprender el origen y estructura, producto de los cuales se tiene tres tipos de rocas: ígneas, metamórficas y sedimentarias.

Una **roca ígnea** (latín ignius, "fuego") es aquella que se forma a partir del material primordial formador de las rocas, el magma, el cual se considera como roca fundida bajo la superficie de la corteza terrestre. Una **roca sedimentaria** es una roca que se forma por la compactación de sedimentos que son partículas de diversos tamaños provenientes de la meteorización y erosión de rocas preexistentes que posteriormente son transportados y sometidos a procesos físicos o químicos, dando lugar a materiales consolidados. Una **roca metamórfica** es aquella que se forma a partir de rocas preexistentes, que han sido sometidas a cambios de presión o temperatura que provocan modificaciones en su textura o estructura cristalina.

4.1.2.1 La tectónica de placas y el ciclo de las rocas

El modelo de la tectónica de placas permite entender el ciclo de las rocas. De acuerdo a este modelo, el material procedente de las masas de tierras elevadas, que ha estado bajo la acción de desintegración y descomposición paulatina por agentes atmosféricos, es transportado desde las cordilleras hacia la corteza o margen continental, donde es

Figura 13. Diagrama metodológico para el cálculo de la recarga mediante balance hídrico. Fuente: Grupo GIGA.



CONVENCIONES

Serie P : Serie diaria continua de precipitación (mm/día)
Serie ETP : Serie diaria continua de evapotranspiración (mm/día)
cc : Capacidad de campo (mm)
pmp : Punto de marchitez permanente (pmp)
CNII : Número de curva en condiciones promedio
So : Humedad inicial en el suelo (pmp)
fi : Fecha de inicio del balance
ff : Fecha de finalización del balance
Ro : Recarga inicial (mm/día)
i : Representa un día en el balance
P_5 : Precipitacion de los 5 días (mm/día)
NCi : Número de curva del día i
HA : Condiciones de humedad antecedente
Smax : Retención máxima de humedad (mm)
Ia : Abstracción inicial para la que no se produce escorrentia directa (mm)
I : Infiltración (mm/día)
ET : Evspotranspiración real (mm/día)
S : Almacenamiento en el suelo (mm)
R : Recarga potencial directa por infiltración (mm/día)

depositado en capas, que sumadas tienen un grosor de miles de metros.

Cuando la margen continental empieza a tener actividad tectónica, la corteza oceánica, más densa y pesada, se desliza debajo de la corteza continental. Este enterramiento termina arrastrando además el material sedimentario, el cual, conforme hay cambios de presión y de temperatura, se transforma en rocas metamórficas o en magma, ingrediente esencial del comienzo y el fin de las rocas.

El ciclo de las rocas empieza con el material primigenio de las rocas ígneas, el magma, formado a profundidad en el interior de la tierra, el cual al hacerse menos denso, empieza a subir hacia la superficie, empezando un proceso llamado cristalización, dado por la pérdida de energía del magma en su camino hacia la superficie, caso en el que la roca se considera *intrusiva o plutónica* (que no llego a superficie). Rocas como granitos y gabros son ejemplos de este tipo de rocas. Cuando el magma llega a superficie, conocido con el nombre de lava, forza a que el magma se cristalice mediante el proceso de solidificación debido a la gran diferencia entre la temperatura de la lava y la del medio atmosférico, caso tal en el que la roca se considera *extrusiva o volcánica*. Las erupciones volcánicas generan este tipo de rocas, tales como basalto y pumitas.

Los sedimentos, material primordial de las rocas sedimentarias, son generados por procesos de meteorización y erosión. Las partículas de diversos tamaños son transportadas por el hielo, agua, el aire o la gravedad, cuando el medio de transporte pierde energía se generan acumulaciones conocidas como depósitos que pueden ser sometidos a procesos físicos, químicos o biológicos que generan su litificación en un proceso llamado diagénesis. La mayoría de los depósitos terminan en los océanos o son arrastrados por los ríos, en cuyo caso se le conoce como *depósitos aluviales*. También se encuentran en las zonas de inundación de los ríos, los desiertos y las dunas.

Según el tipo de meteorización y de donde viene el sedimento, existen dos tipos de rocas sedimentarias. El proceso anteriormente descrito genera

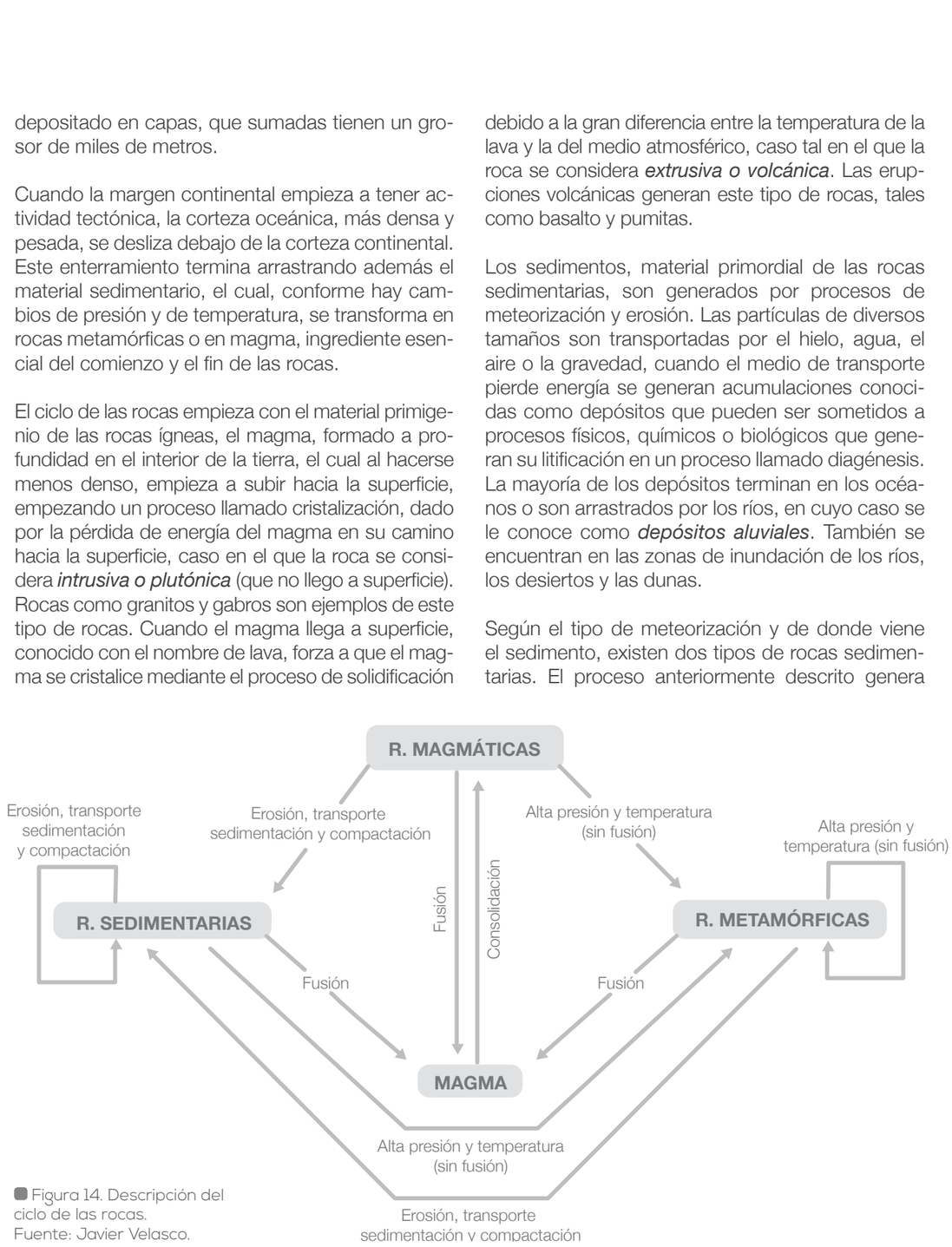


Figura 14. Descripción del ciclo de las rocas.
Fuente: Javier Velasco.

rocas sedimentarias detríticas. Ejemplos de estas rocas son las lutitas, areniscas y conglomerados. Todas ellas son formadas por la meteorización sólida, que no implica cambios más allá que la separación mecánica de la roca. Otra fuente de sedimentos, lo constituye el material soluble producido por la meteorización química, lo cual genera sedimento químico. A estas rocas se les conoce como *rocas sedimentaria químicas*. Las calizas (rocas formadas por carbonato de calcio, material de origen marino) y evaporitas (rocas formadas por la cristalización de sales disueltas en el agua marina costera y de lagunas) son ejemplos de estas rocas.

Si la roca sedimentaria continua siendo sometida, a aumentos de los esfuerzos de presión y de temperatura, además de los fluidos que se encuentran en las profundidades de la tierra, la roca se transforma a otra roca, denominada roca metamórfica. En esta etapa, lo que era una roca sedimentaria ha cambiado de mineralogía y de textura. El metamorfismo también puede presentarse en una roca de tipo ígneo (Tarbuck & Lutgens, 2003).

El metamorfismo puede ser gradual y ligero (llamado de “bajo grado”). Ejemplo: lutita (sedimentaria) cambia a pizarra (metamórfica), o también pueden ser cambios rápidos y notables, en este caso, conocidos como de alto grado, que impide en ciertos casos determinar la roca original de la que provenía. Ejemplos: migmatitas (rocas donde los minerales pasaron por fase fluida).

Cuando la roca metamórfica es sometida a cambios de presión adicionales o temperaturas mayores, la roca se funde mediante el proceso de fusión, generando de nuevo un magma, reiniciando el ciclo con la cristalización de una nueva roca ígnea. La Figura 14 representa los fenómenos asociados a la génesis de las rocas.

Las fuerzas responsables de la permanente formación y transformación del planeta tierra son de origen endógeno (internas) y exógeno (externas), en este sentido además de los factores meteóricos o ambientales deben considerarse al tectonismo y al volcanismo como factores de primer orden. La magnitud de los efectos pueden llegar a cambiar las condiciones físicas del medio sólido, al producir fracturas (abertura generada bajo presión en dos o más piezas de una roca) en el medio rocoso que puede permitir la infiltración de agua hacia el interior de la corteza terrestre, dándose comienzo al origen de las aguas subterráneas.

En la litósfera, considerando como parte de ésta la porción superior de la corteza terrestre, es necesario presentar un panorama general acerca de las propiedades hidráulicas que poseen las rocas en relación con el almacenamiento y la circulación del agua subterránea.

Sin ahondar en explicaciones, se debe señalar finalmente que la presencia de agua fluyendo en las formaciones sólidas de la corteza terrestre, sólo es posible si el medio sólido es poroso y permeable.

La porosidad se determina en términos generales como el “volumen de espacios abiertos en la roca o en el suelo”. Además se puede obtener una relación: división entre el volumen de huecos o vacíos (también llamados poros) y el volumen total de la roca o suelo. En la mecánica clásica, esta relación se lleva a la siguiente expresión, y se denomina porosidad primaria.

Porosidad Primaria (n) = Volumen de vacíos (V_v) / Volumen TOTAL (V_{TOTAL})

El concepto de permeabilidad se refiere a la capacidad que tiene una roca de permitir el flujo agua a través de sus poros interconectados.

4.1.3 El ámbito de la Hidrogeología

Como ya se mencionó antes, la hidrogeología se define como la parte de la hidrología que se ocupa de estudiar el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones tanto con el medio físico, como con el biológico, y sus reacciones ante la acción del hombre. La hidrogeología hace referencia al punto de encuentro

de dos ciencias: la hidrología y la geología. Hidrología y geología son ciencias de la tierra, que permiten entender los fenómenos que determinan la ocurrencia del agua en el subsuelo, son ciencias que se sitúan sobre un lugar y a través de la historia.

Una unidad hidrogeológica se define como una unidad geológica, parte de ella o como un conjunto de unidades geológicas adyacentes susceptibles a reconocerse por poseer propiedades o características hidráulicas similares; en este sentido se tiene que una formación o grupo de formaciones de rocas permeables, saturadas con agua y con un grado de permeabilidad que justifique, en términos económicos, la extracción del recurso hídrico subterráneo, se denomina acuífero; una unidad geológica que contiene agua, incluso hasta la saturación, pero no la trasmite, es un acuicludo; si la circulación es muy lenta se denomina acuitardo; y si la formación no almacena ni transmite agua se denomina acuífugo. Unas y otras pueden estar presentes dentro de un mismo sistema, distribuidas como componentes que se complementan y limitan entre sí (Betancur, 2008).

Según las condiciones de presión a las que se encuentre la superficie del agua en un medio sólido saturado, un acuífero puede ser libre, semiconfinado o confinado. En un acuífero libre la superficie freática se encuentra a condiciones de presión aproximadamente iguales a la atmosférica, mientras que en los semiconfinados y confinados la presión es mayor. Los acuíferos confinados están aislados, en gran parte de su extensión, del ambiente meteórico por la presencia de acuitardos en el techo, los semiconfinados están limitados en una de sus fronteras por una unidad de este tipo.

El movimiento y la capacidad de almacenamiento, son controlados por la porosidad y la permeabilidad.

Los espacios abiertos, vacíos o intersticios en las rocas, son los receptáculos para el almacenamiento y circulación del agua subterránea, y son de dos tipos: i) poros intergranulares (primarios), se encuentran en depósitos detríticos y en rocas volcánicas o sedimentarias clásticas consolidadas, y ii) poros secundarios que resultan de fisuras y fracturas en rocas duras.

Teniendo en cuenta las condiciones texturales y estructurales de los materiales que conforman la corteza terrestre, se ha determinado que los principales acuíferos están asociados a: i) depósitos de gravas y arenas no consolidadas, intercalados frecuentemente con estratos de limos y arcillas, con pocas unidades de carbonatos, ii) unidades kársticas resultantes de formaciones carbonatadas que tienen fisuras y fracturas, y que se han ensanchado por disolución, iii) formaciones consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidades primarias (intergranulares) y secundarias (fracturas y diaclasas), iv) rocas ígneas de origen volcanoclástico, y iv) rocas ígneas y metamórficas con fisuras y fracturas que permiten el almacenamiento y circulación del agua.

El medio permeable presenta tres parejas de características físicas: i) continuidad o discontinuidad, ii) isotropía o anisotropía, y iii) homogeneidad o heterogeneidad. Un medio permeable con vacíos interconectados, en el sentido del flujo, se dice que es continuo. Las rocas porosas y las rocas compactas, con sistemas de fisuras o fracturas interconectadas, se dice que constituyen medios continuos. Las rocas con macrofisuras y las rocas kársticas son medios discontinuos.

Si la resistencia al flujo del agua es la misma en todas direcciones, se dice que el medio es isotrópico. Si la resistencia al flujo varía de acuerdo a las distintas direcciones, se presenta la anisotropía del medio poroso. El medio se dice que es homogéneo si sus propiedades de isotropía o anisotropía son las mismas en todos los puntos, y es heterogéneo si esas propiedades varían de un punto a otro del medio.

Las leyes de la hidrodinámica subterránea debido a la complejidad de las ecuaciones generalmente no se aplican sino a medios homogéneos, isotrópicos y continuos. Darcy formuló una ley experimental con la cual se describe el flujo de agua subterránea en estos medios. Esta ley de flujo de agua en medios porosos, conocida como Ley de Darcy, establece que la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo, a través de una sección transversal de un medio permeable, es directamente proporcional a la conductividad hidráulica y a la diferencia de potencial entre dos puntos, e inversamente proporcional a la distancia. Esta Ley se representa mediante la expresión:

Q= K*i*A
Dónde:
Q: Caudal
K: Conductividad hidráulica
i: Gradiente hidráulico (Δ h/ Δ l)
A: Área de la sección de flujo

4.1.3.1 Exploración hidrogeológica

Para conocer la distribución y las propiedades de las unidades hidrogeológicas, se hace exploración hidrogeológica, entendida esta como “el conjunto de operaciones o trabajos que permiten la localización de acuíferos o embalses subterráneos, de los que se puede obtener agua en cantidad y calidad adecuada para el fin que se pretende” (Custodio y Llamas, 1997).

El diagrama de la Figura 15 sintetiza el conjunto de procedimientos que hacen parte de la exploración hidrogeológica, el resultado de esta es un modelo hidrogeológico conceptual, el cual representa un conjunto formado por cinco elementos principales: i) las unidades hidrogeológicas y su geometría, ii) las áreas, fuentes y magnitud de la recarga, iii) la red de flujo, iv) las propiedades hidráulicas, y v) las características de calidad del recurso hídrico subterráneo.

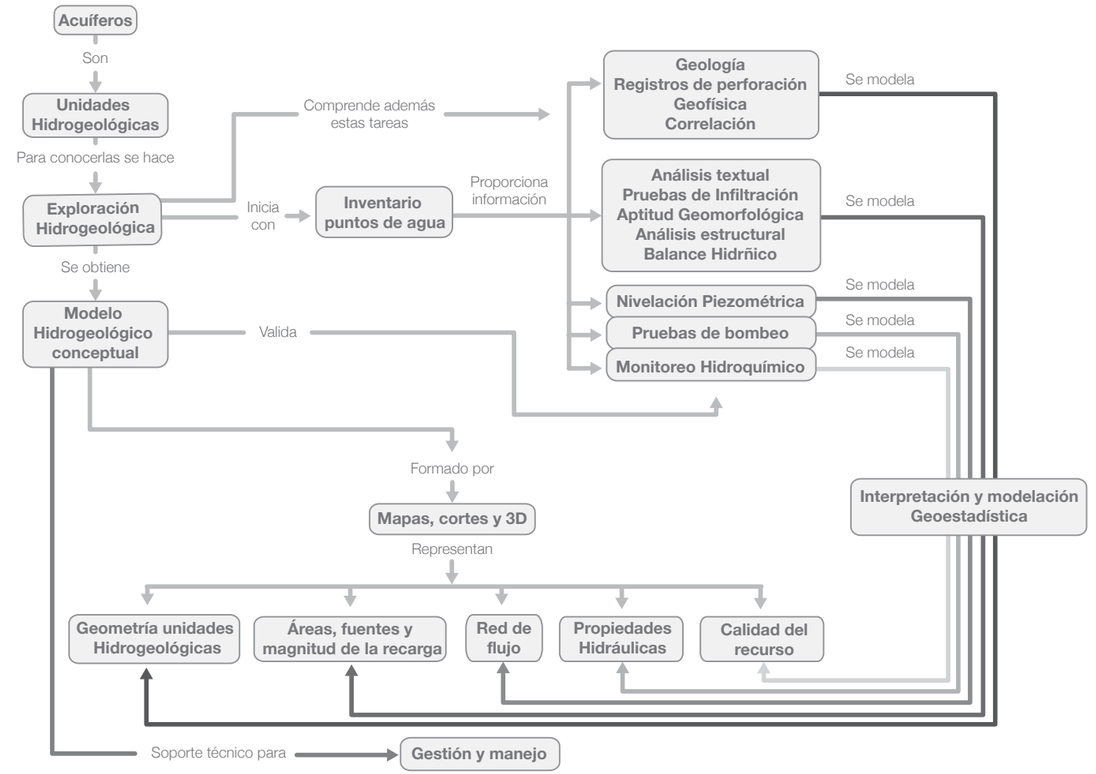


Figura 15. Metodología para la exploración hidrogeológica y construcción de un modelo hidrogeológico conceptual.
Fuente: Adaptado de Betancur, 2008.

Las actividades de exploración, inician con la recopilación de información disponible, que permite una primera aproximación al conocimiento del medio, tanto en términos geográficos como hidrológicos, esta información comprende: cartografía básica, información hidrometeorológica, mapas y estudios geológicos, mapas de tipos y usos del suelo, cobertura vegetal, estudios hidrogeológicos previos, fotografías aéreas o imágenes de satélite, registros de perforaciones o de estudios geofísicos, entre otros.

La recolección de datos, denominada comúnmente inventario de puntos de agua, es el sistema más idóneo para empezar a conocer rápidamente las características hidrogeológicas de una zona dada. Los datos reunidos se consignan en formatos previamente diseñados, de manera que se puedan incorporar en ellos diferentes elementos que proporcionen información útil para el conocimiento del sistema hidrogeológico, como: localización administrativa (municipio, vereda, barrio), aspectos técnicos del punto (naturaleza de la obra, modo de perforación, diámetro, materiales, profundidad, etc.), condiciones hidrológicas (niveles piezométricos en diferentes épocas, calidad química), entorno geológico (litología y geomorfología), usos que se hacen del recurso hídrico subterráneo, etc.

Además, la exploración comprende una serie de tareas que apoyan la construcción del modelo hidrogeológico, el cual se representa principalmente mediante mapas, secciones transversales o esquemas cartográficos en tres dimensiones -3D. En el campo de la definición de la geometría de las unidades acuíferas, sus propiedades hidráulicas y de flujo, si se tiene información suficiente, la ruta de la modelación geoestadística permite una buena construcción pictórica del sistema mediante modelos digitales del terreno MDT. Un MDT es un simulador matemático de la representación física del terreno o de un atributo de interés. A través del proyecto de investigación: Plataforma SIG para la modelación de sistemas acuíferos (Escobar, 2011), se ha desarrollado una herramienta que permite construir mallas de celdas o puntos para la representación de las unidades y construcción de paleotopografías.

Para la obtención de los productos del modelo hidrogeológico, geometría, recarga, red de flujo, propiedades hidráulicas y calidad de agua, es necesario el uso de diversos procedimientos de estimación o simulación mediante la interpolación y modelación geoestadística. Esto es, a partir de un conjunto de muestras o datos, tomados en localizaciones del dominio en que se manifiesta un fenómeno a estudiar, y consideradas representativas de su realidad, que por lo general es siempre desconocida, estos procedimientos permiten obtener la descripción o caracterización de las variables con dos fines diferentes: primero, proporcionar valores estimados en localizaciones de interés y segundo, generar valores que en conjunto presenten iguales características de dispersión que los datos originales.

El desarrollo de los sistemas de información Geográfica (SIG) y la aplicación de la geoestadística han dado un nuevo impulso al análisis de la información espacial aplicada a la hidrogeología.

El resultado de la exploración hidrogeológica básica en una zona determinada es un modelo conceptual del sistema acuífero existente. El propósito de construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de manera efectiva. La simplificación es necesaria porque una reconstrucción completa del sistema es imposible. Tal como lo expresa Bredehoeft (2005), un modelo conceptual es la idea básica o construida de cómo operan los sistemas y procesos. Además, las leyes matemáticas en que se basa la hidrogeología se apoyan en la física de sistemas simples, continuos y homogéneos en sus propiedades, que se aplican a sistemas desconocidos o parcialmente conocidas en espacio y tiempo.

Como en todos los casos, la calidad de los modelos hidrogeológicos obtenidos depende de la calidad de la información que pueda ser obtenida para su construcción, la que a su vez está limitada por la disponibilidad de recursos financieros. Hay que señalar que un modelo hidrogeológico contiene numerosas interpretaciones cualitativas y subjetivas; la prueba de su validez solo se logra mediante la aplicación de técnicas de investigación específicas (hidrogeoquímica, isotopía, geoestadística) y luego de que se construya un modelo numérico y se comparen los resultados de la simulación con las observaciones de campo.

Bredehoeft (2005) refiriéndose a la certidumbre de los modelos conceptuales utiliza el término SORPRESA y lo relaciona con la situación en la cual la colección de nueva información invalida un modelo conceptual original. La sorpresa puede surgir a causa de la revisión de la teoría científica o como consecuencia de la nueva información que se obtenga sobre un sitio particular. Según el mismo autor, la sorpresa ocurre en 20-30% de los casos estudiados, indicando esto que no es fácil construir un modelo hidrogeológico apropiado.

Carrera et al (2005) sostiene que dada la incertidumbre inherente al conocimiento de la naturaleza de los medios subterráneos, para los que se cuenta con información cuantitativa (hard) pero también cualitativa (soft), es posible llegar a tener para un mismo sistema varios modelos conceptuales.

Geometría de las unidades hidrogeológicas

Una vez identificadas las unidades hidrogeológicas y definido su carácter, se debe proceder a efectuar la representación de su extensión superficial y en profundidad, esto es, determinar su geometría.

Para la definición del modelo geométrico se requiere: a) contar con una geología detallada del territorio, b) procesar la información recopilada durante el inventario, con el fin de identificar registros de perforación, c) refinar la prospección del subsuelo mediante la realización de pruebas geofísicas, d) definir las unidades hidroestratigráficas a partir de la correlación de la información disponible de columnas estratigráficas. Correlacionar es establecer una correspondencia en carácter y posición estratigráfica, para la correlación de las unidades hidrogeológicas se tienen en cuenta características texturales, granulometría, espesores, continuidad y posición relativa en profundidad, de las unidades estratigráficas de cada columna.

Delimitación de áreas, fuentes y magnitud de la recarga

La definición de la recarga hace referencia a dos elementos: la identificación de fuentes y áreas de recarga y la cuantificación de la misma, esta última se obtiene como resultado, normalmente, de un balance hídrico.

La Figura 16 describe las áreas y fuentes de recarga y los métodos para su correspondiente determinación. En el esquema se ilustran los procesos de recarga directa, aportes desde cuerpos superficiales y los flujos regionales que abastecen a un acuífero.

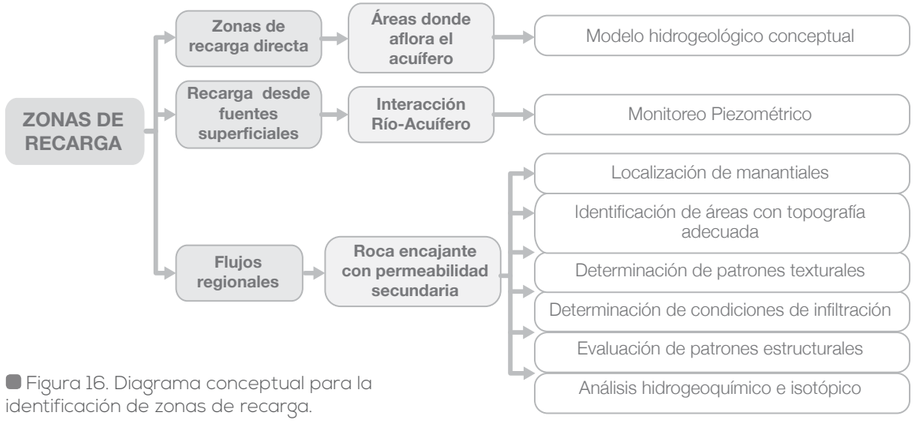


Figura 16. Diagrama conceptual para la identificación de zonas de recarga.

En las áreas donde los acuíferos afloran en superficie es propicia la recarga directa, ella ocurre a tasas variables dependiendo de las condiciones texturales de la zona no saturada y para ellos, las áreas donde afloran y no han sido impermeabilizados en su superficie por acción de los procesos de urbanización, se constituyen en las zonas de recarga directa. Según variaciones piezométricas, puede presentarse puntual y temporalmente aportes de agua al acuífero desde corrientes o lentes de agua. Las características topográficas del terreno representan el primer factor determinante para favorecer o no la escorrentía superficial, sólo en aquellas áreas donde se registren paisajes planos, suaves u ondulados, puede ocurrir el almacenamiento, o retención en superficie que posibilite luego la infiltración; sin embargo, para que se de este proceso es preciso que el suelo posea ciertas condiciones de permeabilidad, según las cuales los grados de humedad del suelo alcancen dimensiones propicias para el flujo de agua a través de él. En la Figura 17 se esquematizan estos procesos y tipos de recarga.

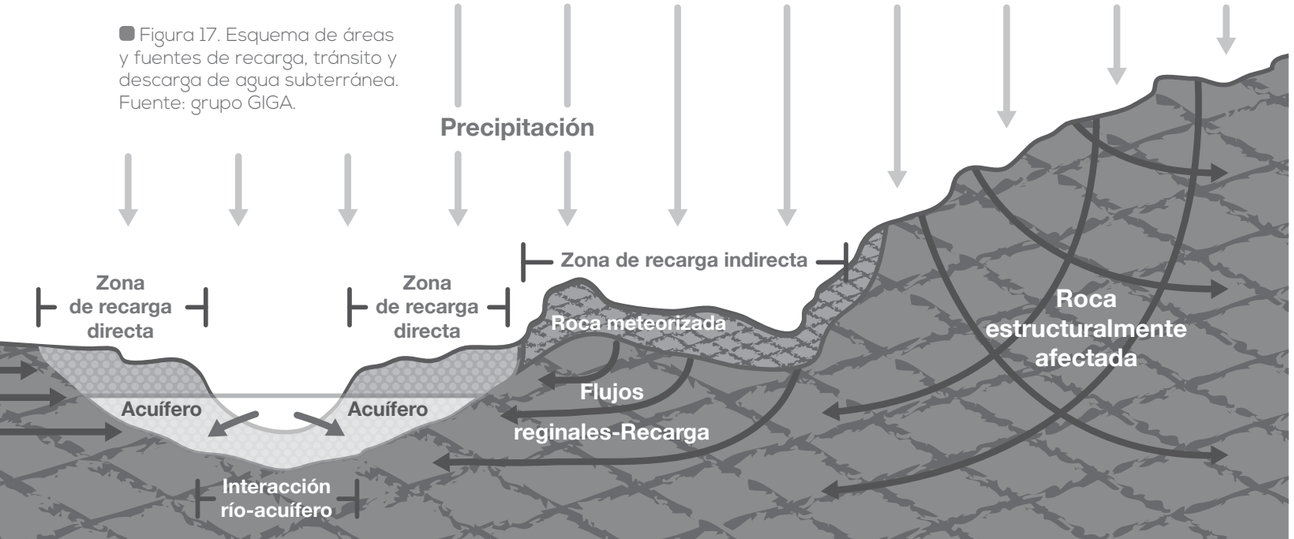
La permeabilidad secundaria en rocas duras, se adquiere mediante procesos de meteorización física y química que pueden convertir los saprolitos en suelos, o que pueden configurar rutas preferenciales para el movimiento de fluidos según disposición, apertura y densidad de las diaclasas. Así, el agua que se almacena y fluye por un acuífero puede provenir de la recarga directa, a partir de los excedentes de la precipitación local, o puede comprender flujos regionales que en ocasiones llegarían a involucrar largas distancias y prolongados tiempos de recorrido.

Los flujos regionales se dan normalmente a partir de rocas encajantes del sistema acuífero, que han adquirido condiciones de porosidad y permeabilidad secundaria. Para identificar las áreas que adquieren esta condición, se realiza el análisis cruzado de una serie de características de las unidades hidrogeológicas, que sirven de basamento a los embalses subterráneos.

La evaluación de las propiedades texturales de la zona no saturada, característica que se hereda de la roca madre, de acuerdo con los procesos de meteorización física y química que ella haya sufrido, arroja elementos de juicio para estimar la dimensión que puede cobrar el flujo vertical de agua a través de ellos, como potencial contribución a la recarga.

La textura del suelo hace referencia a las proporciones en que se encuentran distribuidos los diferentes tamaños de grano en una muestra de suelo. Este elemento se encuentra directamente relacionado con la porosidad eficaz, la cual no sólo depende del tamaño de las partículas, sino también del tiempo de drenaje para los materiales más fino-granulares. El análisis de las propiedades texturales se obtiene mediante análisis granulométricos.

Figura 17. Esquema de áreas y fuentes de recarga, tránsito y descarga de agua subterránea. Fuente: grupo GIGA.



Las pruebas de infiltración se realizan generalmente por el método de los anillos concéntricos, que tienen como propósito evaluar la tasa de infiltración de agua al subsuelo, factor determinante para la recarga y las condiciones de flujo subterráneo. Éstas permiten conocer la cantidad de agua que se infiltra en el suelo en un área cerrada, a partir del nivel del agua que va descendiendo a medida que pasa al subsuelo, tomándose las medidas en un intervalo de tiempo establecido al momento de iniciar la prueba, de modo que el descenso de la lámina de agua no sea mayor a dos centímetros, en el intervalo de tiempo que se haya establecido.

Las características topográficas del terreno son un factor determinante para favorecer o no la escorrentía superficial, sólo en aquellas áreas donde se registren paisajes planos, suaves u ondulados puede ocurrir el almacenamiento o retención en superficie, que posibilite luego la infiltración; sin embargo, para que se de este proceso es preciso que el suelo posea ciertas condiciones de permeabilidad, según las cuales los grados de humedad del suelo alcancen dimensiones propicias para el flujo de agua a través de él.

El análisis estructural tiene como objetivo identificar familias y patrones de diaclasamiento, que posibiliten el flujo regional hacia las unidades acuíferas. Para realizar esta tarea se deben considerar direcciones y ángulos de buzamiento de las estructuras, densidad de diaclasamiento, apertura de fracturas y características de rugosidad de los planos.

La última tarea que se debe realizar para la determinación de la recarga es el balance hídrico, el cual se basa en el principio de conservación de masa. Este principio considera la existencia de un sistema, en el que hay un intercambio de flujos de entrada y salida, y en el cual se produce un cambio en el almacenamiento en función del tiempo. El uso extendido de esta técnica se debe a su facilidad de aplicación, y a la disponibilidad de la información que se requiere, que es en esencia información hidrometeorológica.

Red de flujo

El nivel freático define el límite de saturación del acuífero libre y coincide con la superficie piezométrica. A partir de dicha superficie es posible conocer la dirección que toma el flujo subterráneo, el cual sigue una trayectoria perpendicular a las líneas de igual nivel piezométrico, desde la más alta hacia la más baja.

La superficie piezométrica es el lugar geométrico que representa los niveles del agua subterránea y su distribución en el espacio, a partir de ella se determinan direcciones de flujo y por lo tanto se identifican áreas de recarga indirecta, zonas de tránsito y lugares de descarga. Ese componente, uno de los más importantes de los modelos conceptuales, se obtiene mediante monitoreo de campo y se valida con la utilización de técnicas hidroquímicas e isotópicas.

Propiedades hidráulicas

Cuando se hace referencia a las propiedades hidráulicas de una unidad hidrogeológica, se citan tres parámetros fundamentales: conductividad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento. El gradiente hidráulico al que hacen referencia estas definiciones, representa la pérdida de cabeza piezométrica por unidad de longitud. Tal como se enuncia en la ley de Darcy, se requiere de la existencia de un gradiente hidráulico para que haya flujo subterráneo.

Los datos, que permiten mediante la relación caudal, tiempo, abatimiento y recuperación, calcular las propiedades hidráulicas de los acuíferos (conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento), se obtienen a partir de la realización de pruebas de bombeo.

Calidad del recurso

La contaminación del agua subterránea, se define como la alteración indeseable en su calidad, a consecuencia del desarrollo de actividades humanas. El Servicio Geológico Estadounidense define la ca-

lidad del agua, como una medida de lo apta que puede ser una fuente para un uso particular, basada en el análisis de sus características biológicas, físicas y químicas.

Generalmente cada país emite normas acerca de que parámetros deben medirse para cada tipo de uso y cuáles son los límites permisibles. En Colombia las normas de calidad para aguas, cuya destinación será el consumo humano, están regidas por la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007, en la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua. Adicionalmente, en el Decreto 1594 del 1984 se definen criterios de calidad para aguas crudas que van a ser tratadas para consumo humano y para otros usos.

Adicionalmente la hidrogeoquímica y la isotopía permiten realizar una evaluación de la evolución del agua a través de las formaciones geológicas, y constituyen metodologías para la validación de fuentes y rutas del agua.

Validación de modelos hidrogeológicos

La composición química del agua subterránea es el resultado combinado de la composición del agua que ingresa al acuífero y sus reacciones con los minerales presentes en la roca a través de la cual circula o con la que ha estado almacenada, o con sustancias contaminantes que afectan su calidad (Appelo & Postma, 1999). A partir de monitoreos hidroquímicos se puede obtener un marco de referencia general sobre la hidroquímica, la hidrogeoquímica y la calidad del agua subterránea.

Una buena manera de caracterizar químicamente el agua y establecer una aproximación tentativa acerca de su origen y grado de evolución, es considerando la concentración de iones mayores (sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-) y nitratos (NO_3^-)), definiendo facies hidrogeoquímicas. Y aplicando el principio establecido en la serie de Chevotareb según el cual, dependiendo de la solubilidad y abundancia de elementos químicos, y el tiempo de reacción, las aguas subterráneas empiezan siendo, según la concentración de aniones, bicarbonatadas, luego sulfatadas y finalmente cloruradas y, de acuerdo con los cationes, cálcicas, magnésicas y después sódicas.

Más allá de la hidrogeoquímica, la hidrología isotópica, proporciona nuevos caminos para validar el conocimiento en relación con rutas de flujo del agua subterránea, desde el origen, zonas de recarga, tránsito y descarga; y acerca de la edad y tiempo de residencia. Los isotopos estables de la molécula de agua ^{18}O y ^{2}H (Deuterio) son trazadores del ciclo hidrológico, el ^{3}H (Tritio) y el ^{14}C permiten definir edades.

4.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

En El Bajo Cauca antioqueño se conjugan condiciones geológicas, geomorfológicas, edafológicas e hidrológicas que favorecen la configuración de un sistema con un acuífero libre y otro confinado. El acuífero libre es la única fuente segura de abastecimiento de agua para consumo doméstico para más de 150.000 personas (Betancur, 2008), y constituye un elemento regulador de caudales de corrientes y cuerpos lénticos, contribuyendo así al sostenimiento de los ecosistemas que en torno a ellos crecen. Como resultado de los estudios de exploración hechos hasta ahora, se ha construido una interpretación de los componentes y procesos que intervienen en este sistema hidrogeológico, con una buena caracterización del acuífero libre, y una descripción que en poco trasciende el reconocer su ocurrencia, para el acuífero confinado. Se requiere de la realización de nuevas pruebas geofísicas y de perforaciones exploratorias hasta el basamento, para completar las descripciones y correlaciones que permitan una modelación más precisa de su geometría. Luego será necesario la implementación de pruebas hidráulicas y redes de monitoreo, para determinar parámetros hidráulicos y definir superficies piezométricas y redes de flujo, que consideren toda la extensión de interés hidrogeológico en El Bajo Cauca.

En 2012, en el marco del programa AQUIFERURAL, del CYTED, Ribeiro et al, realizaron una síntesis a modo de monografía del sistema acuífero de El Bajo Cauca, parte de esa compilación se retoma aquí para describir el modelo hidrogeológico. Los elementos que se describen como parte del modelo comprenden: a) la identificación y delimitación superficial y en profundidad de las unidades hidrogeológicas, b) la determinación de áreas y cálculo de la recarga, c) la definición de la red de flujo subterráneo, d) el conocimiento de las propiedades hidráulicas y e) la identificación de la calidad del agua.

4.2.1 Unidades hidrogeológicas

De acuerdo con los mapas geológicos de Antioquia (González, 1996) a escala 1:400.000 y de Córdoba (González y Londoño, 2001) a escala 1:250.000, y según los trabajos a escala 1:100.000 de Zapata y Cossio (1997) y 1:25.000 de CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia (2003, 2004 y 2005), el contexto geológico de El Bajo Cauca, que se ubica en el piedemonte de las cordilleras Occidental y Central de Los Andes colombianos, está conformado por rocas sedimentarias detríticas de ambiente continental a transicional, de edad Terciario, y depósitos aluviales no consolidados, pertenecientes al Cuaternario, emplazados sobre rocas metamórficas e ígneas del Paleozoico.

El dominio del sistema hidrogeológico en El Bajo Cauca antioqueño está ubicado en la llanura aluvial que se abre en el piedemonte andino de Colombia. Está conformado por rocas sedimentarias y depósitos aluviales emplazados sobre rocas metamórficas e ígneas. La zona evaluada hasta ahora, comprende una superficie de 3.273 km^2 y está limitada al norte y noroeste por la frontera del departamento, que coincide parcialmente con la divisoria de aguas superficiales entre los ríos Man y Cauca con el río San Jorge; al sur por las formaciones geológicas de Roca Cristalina, y al este por la divisoria de la cuenca del río Cacerí y por el río Nechí.

El dominio geográfico de El Bajo Cauca, posee características geológicas e hidrológicas que han favorecido el almacenamiento de agua subterránea. El sistema acuífero de El Bajo Cauca antioqueño está conformado por tres unidades hidrogeológicas, son ellas el Acuífero Libre de El Bajo Cauca (unidad hidrogeológica U_{123}), un acuitardo (unidad U_4) y el Acuífero Confinado Panzenú (unidad U_5), su distribución espacial y en profundidad se presentan en el mapa y en los cortes de la Figura 18.

En el Acuífero Libre de El Bajo Cauca, se conjugan, cubiertas por una delgada capa de suelo, los depósitos aluviales de los ríos Cauca, Man, Nechí y Cacerí y el saprolito poco consolidado de las rocas sedimentarias del Terciario del Miembro Superior de la Formación Cerrito. El acuífero libre en toda su extensión abarca la planicie del área de estudio, alcanzando espesores de hasta 90 m, esta unidad se hace considerablemente menos potente, incluso por debajo de los 10 m, hacia el norte y el occidente, en los límites con el departamento de Córdoba, y hacia el sur en la vertiente andina (Figura 19).

La Unidad hidrogeológica correspondiente al acuitardo subyace en toda el área de estudio al acuífero libre, está constituida por el Miembro Medio de la Formación Cerrito. Aun cuando atendiendo a la magnitud de sus propiedades hidráulicas se la ha dado la denominación de acuitardo, en esta unidad existen varias captaciones desde las cuales se extrae agua para satisfacer demandas domésticas. Los espesores del acuitardo disminuyen desde 100 m hasta que la unidad desaparece al norte; los órdenes de magnitud de las profundidades (Figura 20) son en general coincidentes con el sentido de los espesores, así en el centro del área se alcanzan los 160 m, al norte aproximadamente 20 m y al sur son inferiores a 10 m.

El Miembro Inferior de La Formación Cerrito, constituye el Acuífero Confinado Panzenú, sus espesores (Figura 21) varían entre 10 y más de 100 m, esta unidad poco explorada y explotada podría constituir una importante reserva de agua subterránea para la subregión; al igual que los espesores, la profundidad de la base de este acuífero es incierta, llegando a superar seguramente los 260 m.

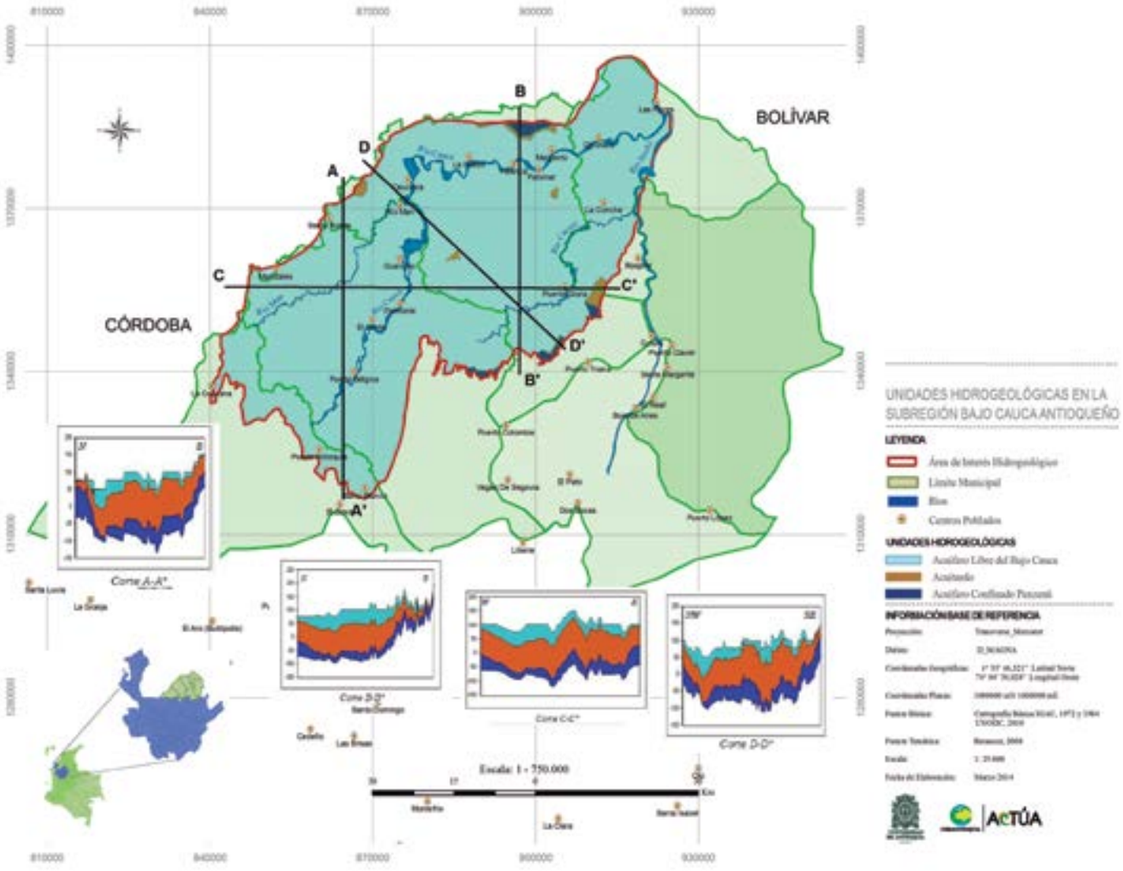


Figura 18. Unidades hidrogeológicas en El Bajo Cauca antioqueño. Fuente: Grupo GIGA.

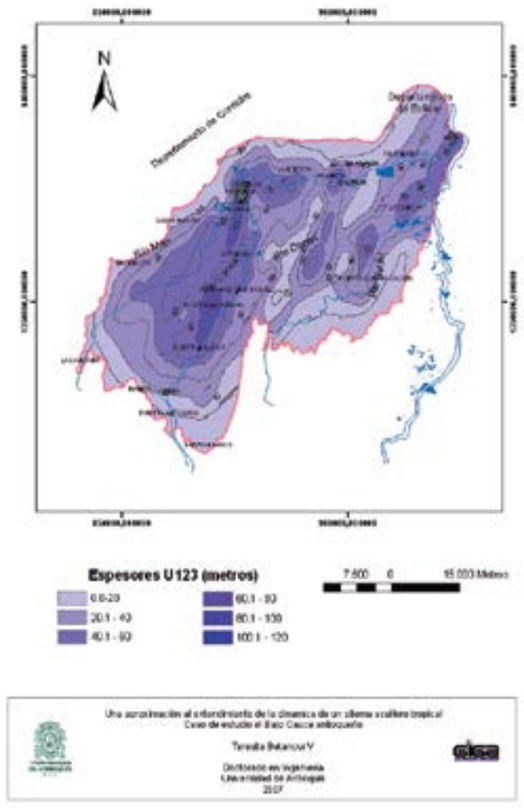


Figura 19. Espesores del Acuífero Libre del Bajo Cauca antioqueño.
Fuente: Betancur, 2008.

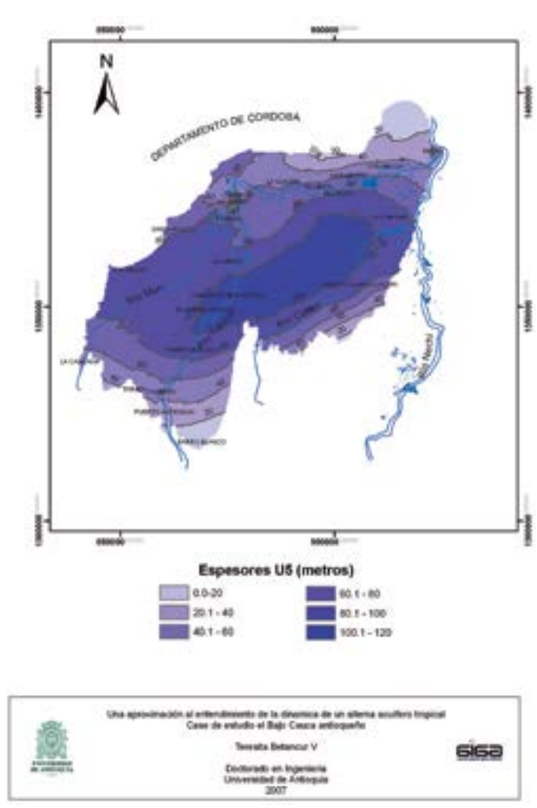


Figura 20. Espesores del Acuitardo del Bajo Cauca antioqueño.
Fuente: Betancur, 2008.

4.2.2 Áreas de recarga

La región Andina en Antioquia está caracterizada por un régimen pluviométrico bimodal, con dos estaciones lluviosas, una entre abril y mayo y la otra desde septiembre hasta noviembre, y dos períodos secos, entre junio y agosto el primero y luego de diciembre a marzo; pero hacia el norte, después de pasar el Alto de Ventanas, conforme se desciende desde los 2.500 m de altura hasta llegar al piedemonte e ingresar en El Bajo Cauca, para alcanzar luego a la región Caribe, el comportamiento de la precipitación se torna monomodal, situación que está acompañada de la ocurrencia de un gradiente pluviométrico con una disminución de la precipitación en sentido región Andina – región Caribe. La distribución espacial según la configuración de las isoyetas para Antioquia, revela un gradiente claro en los valores totales anuales y mensuales, en dirección noroeste a sureste. La zona más húmeda se sitúa hacia las cabeceras del río Man y la cuenca del río Cacerí, con totales anuales del orden de 4.300 mm, indicando el efecto orográfico asociado a las estribaciones de las cordilleras Occidental y Central. En la porción noroeste la lámina total anual se ubica alrededor de 2.300 mm.

La distribución espacial del acuífero libre, los atributos geomorfológicos del paisaje, la hidrografía, el tipo de cobertura, las características hidráulicas de los suelos y las condiciones hidrometeorológicas, condicionan la recarga. Para El Acuífero Libre de El Bajo Cauca, se identificaron tres fuentes de recarga (Figura 22): i) una recarga distribuida a lo largo y ancho de la planicie, ocasionada por la infiltración directa del agua lluvia, ii) se produciría recarga a través de la interacción hidráulica que existe entre los principales cuerpos de agua superficial como lo son los ríos Cauca y Man y desde algunas ciénagas y jagüeyes, iii) finalmente se darían aportes desde flujos regionales en la roca metamórfica encajante del sistema regional, tanto hacia el acuífero libre como hacia el acuífero confinado.

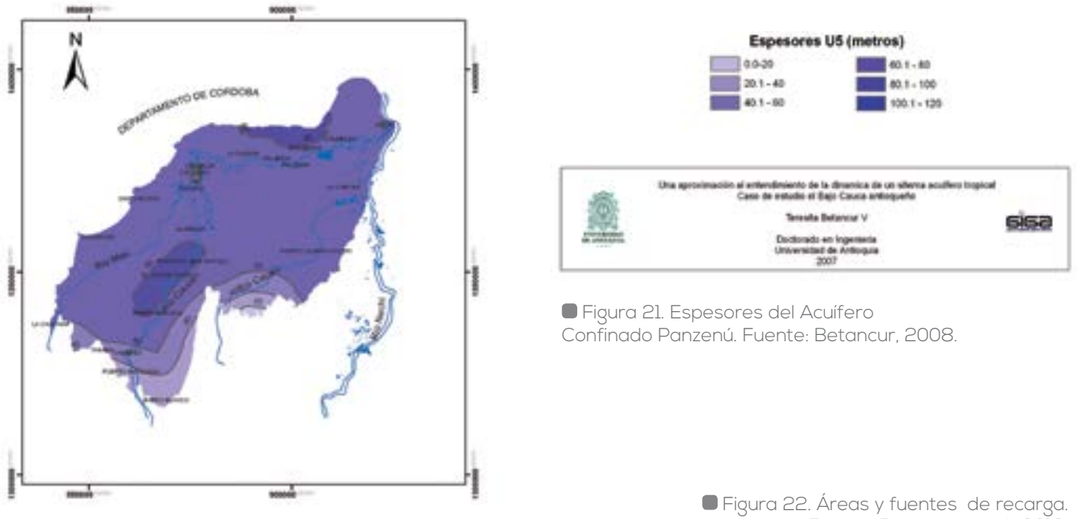
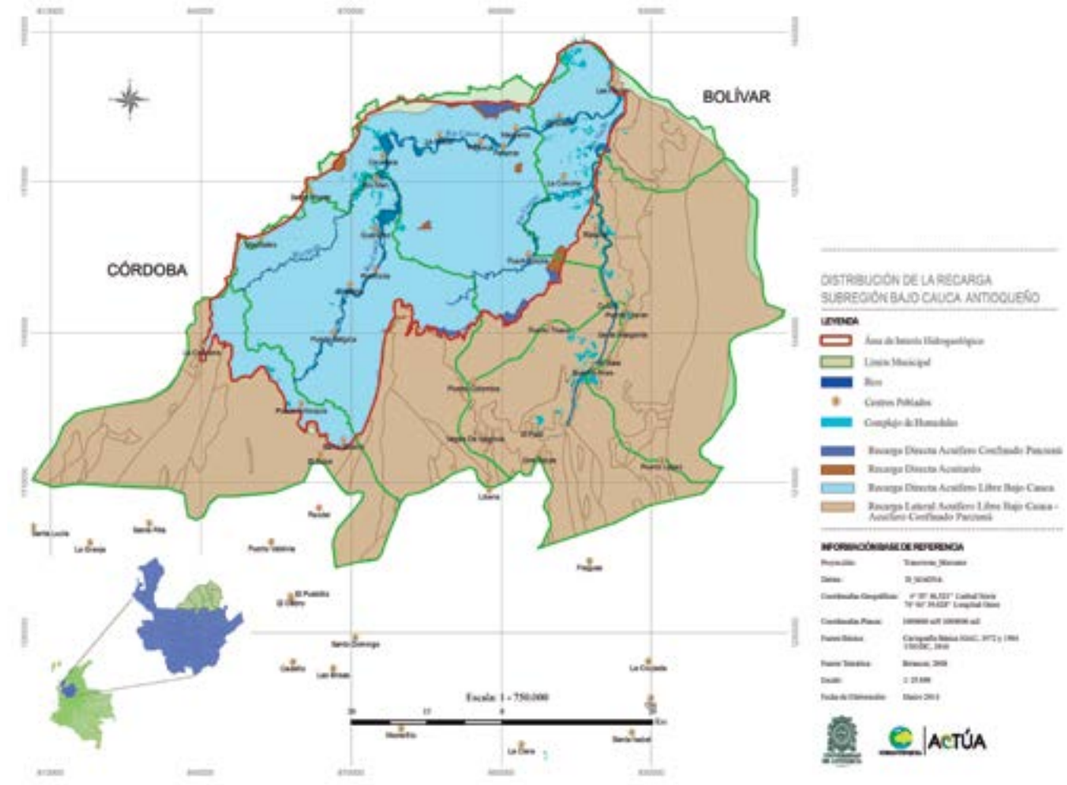


Figura 21. Espesores del Acuífero Confinado Panzenú. Fuente: Betancur, 2008.

Figura 22. Áreas y fuentes de recarga. Fuente: Betancur, et al., 2012.



La procedencia del agua que satura al acuitardo, se daría a través de la conexión vertical con el acuífero libre, desde la que se produciría goteo y con el confinado, desde la cual podría haber ascensos verticales.

La fuente de recarga para el Acuífero Confinado Panzenú estaría asociada a áreas distantes, localizadas en el piedemonte a alturas entre 300 y 1000 m.s.n.m., habrían también algunos aportes verticales por goteo desde el acuitardo. Esta unidad está por explorar, para obtener un adecuado modelo de ella.

Un balance hídrico por estación de precipitación, insinúa un gradiente ascendente en la magnitud de la recarga desde el noroeste hacia el sureste, mientras que un balance por unidad de suelo, según las asociaciones presentes en el área de estudio, refleja una situación algo diferente; sin embargo, en términos generales, si se considera en cualquier caso la relación porcentual entre precipitación promedio y recarga, las magnitudes son equiparables (Gómez, 2010). Los promedios ponderados por unidad de suelo registran una recarga de 1.273 mm para el año medio, 982 mm para el periodo seco y 1.729 mm para un año húmedo. La síntesis mensual por estaciones indica que en condiciones hidrológicas, el promedio de los máximos valores de recarga se producen en septiembre y las condiciones críticas mínimas se dan en marzo; durante un año El Niño, entre junio y septiembre hay recarga, pero entre enero y abril cesan los aportes de la precipitación. En un año húmedo, durante el periodo junio a octubre se presentan importantes entradas al acuífero.

4.2.3 Flujo de las aguas subterráneas: tránsito y descarga

En épocas de lluvia el nivel freático se localiza cerca de la superficie y según se aprecia en la Figura 23 el flujo subterráneo tendría importantes divisorias entre los ríos Man y Cauca, y entre los ríos Cauca y Cacerí, definiéndose áreas donde el agua fluiría desde altos freáticos, localizados entre 90 y 140 m, hacia las grandes corrientes superficiales a las cuales aportaría caudal base. También desde el norte, en límites con el departamento de Córdoba, el flujo subterráneo se daría hacia el río Cauca. Al occidente, en la vertiente izquierda del río Man, sólo se logra dibujar de manera aproximada un flujo hacia el cauce y tal vez en algunos sitios en sentido opuesto. Durante el verano, con un descenso promedio del nivel freático de 5 m con relación al invierno, de acuerdo con la Figura 24, las divisorias de flujo subterráneo se marcan de forma más definida.

4.2.4 Propiedades hidráulicas del Acuífero Libre de El Bajo Cauca.

A la fecha, no se ha logrado obtener una adecuada caracterización de las propiedades hidráulicas del Acuífero Libre de El Bajo Cauca. A partir de unos pocos datos de conductividad hidráulica, obteni-

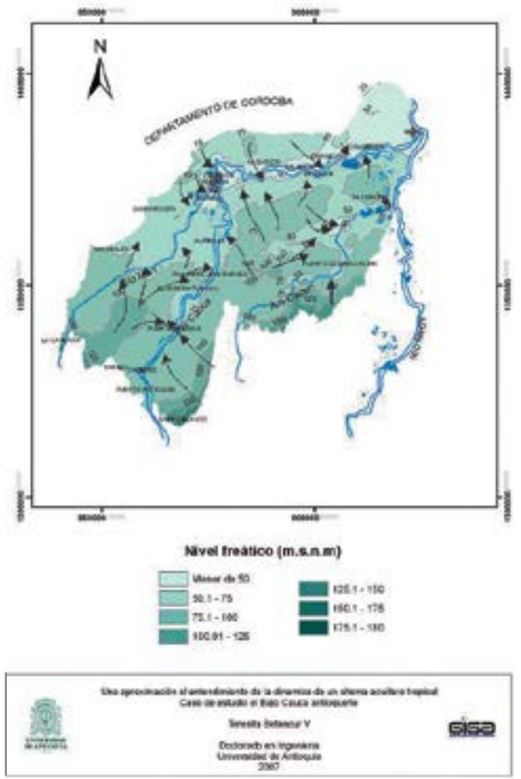


Figura 23. Nivel freático en época de invierno. Fuente: Betancur, 2008.

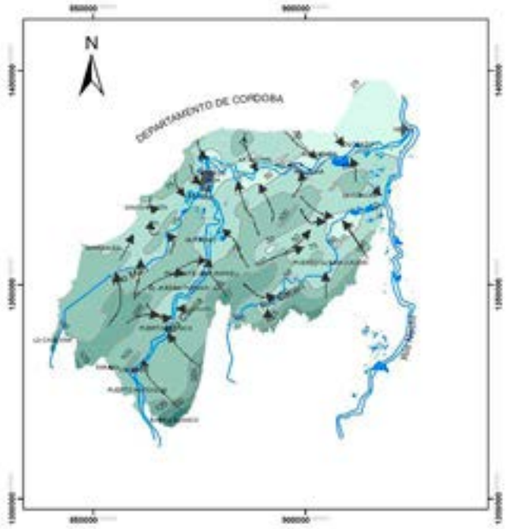


Figura 24. Nivel freático en época de verano.
Fuente: Betancur, 2008.

dos mediante la realización de una serie de pruebas de bombeo, realizadas con muchas limitaciones técnicas, se obtuvo el modelo de distribución espacial de este parámetro (Figura 25), según el cual, se tendrían valores entre 1 y 2 m/día, con zonas en las que se llega a 3 m/día. Estos resultados deben ser manejados con cautela a la espera de poder obtener más información, que permita una mayor confiabilidad en su espacialización.

4.2.5 Calidad del agua subterránea

La afectación a la calidad del recurso hídrico subterráneo almacenado en el acuífero libre registra valores por encima de los rangos establecidos en la normatividad vigente en Colombia sobre calidad de agua para consumo humano. En términos generales, el 21% de las captaciones no cumplen el criterio de color, el 19,7% con el de turbiedad, el 22% el de alcalinidad, el 19,7% de las muestras superan el valor admisible de hierro total y el 62% está por fuera de los rangos de pH, la demanda química de oxígeno -DQO- y los nitritos registran el 13% y 11% de muestras por fuera de los rangos permitidos para esos parámetros. En todos los sitios y en todos los muestreos realizados, se han encontrado presentes concentraciones variables de coliformes (Betancur, 2008). En muestreos puntuales, realizados por CORANTIQUIA entre 2008 y 2012, no se detectó evolución positiva a esta situación.

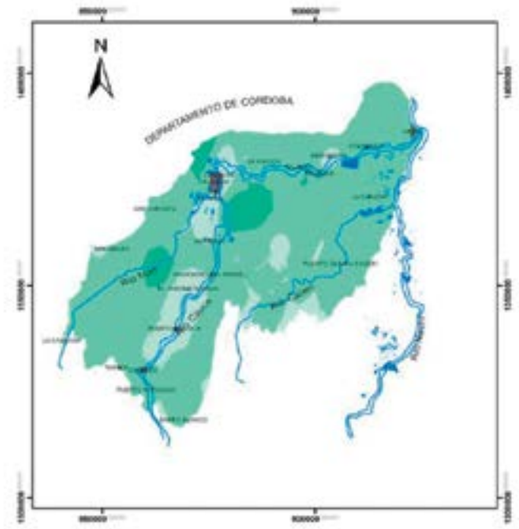


Figura 25. Distribución de los valores de conductividad hidráulica para la unidad hidrogeológica U_{123}.
Fuente: Betancur, 2008.

4.3. VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

Los análisis hidrogeoquímicos e isotópicos practicados sobre muestras de agua lluvia, superficial y subterránea, permitieron validar el modelo hidrogeológico. A partir de los resultados y del análisis de facies hidroquímicas, se evidenció una estratificación en relación con la composición del agua subterránea en el acuífero libre: en los 20 m superiores, el agua tiene una naturaleza bicarbonatada cálcica y a profundidades mayores es bicarbonatada sódica. Fue a partir de los datos de composición isotópica que pudo encontrarse una explicación a esta diferencia: la marca isotópica de los niveles menos profundos es la misma que la del agua lluvia local, mientras que los valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de las aguas que se encuentran por debajo de los 20 m son equivalentes a los de las lluvias que se registran entre los 300 y 1.000 m en las vertiente de las cordilleras Central y Occidental. Esto significa que efectivamente desde la zona montañosa, al sur del área de estudio, se están produciendo aportes regionales de agua subterránea.

4.4 DISPONIBILIDAD Y NECESIDAD DE AGUA SUBTERRANEA EN EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

No se cuenta aún con suficiente información para poder cuantificar la oferta y disponibilidad de agua subterránea en los acuíferos libre y confinado del sistema hidrogeológico en El Bajo Cauca antioqueño. A partir de los resultados del balance hídrico que permitieron calcular la recarga directa al acuífero libre de la región, se estima que anualmente ingresaría al medio subterráneo alrededor de 2.900 millones de metros cúbicos de agua, extrapolando los resultados obtenidos por Gómez (2010) para la cuenca Media y Baja del río Man, no menos del 30% de esta agua se convertiría en flujo base, siendo entonces la recarga neta cercana a los 2.060 millones de metros cúbicos. Sin embargo, esta cifra no corresponde, y no puede asimilarse, a la disponibilidad de agua subterránea en el sistema hidrogeológico regional. Se tiene evidencia comprobada de aportes regionales de agua subterránea al acuífero libre, a profundidades mayores de 30 m, y además existe un acuífero confinado, casi desconocido en el que sin lugar a dudas se almacenan importantes reservas, no sólo en términos de cantidad sino también de calidad.

El agua subterránea constituye la única fuente de abastecimiento permanente para satisfacer la demanda de la mayoría de los habitantes de esta subregión, para el casco urbano de Caucasia este recurso es una fuente complementaria e importante de abastecimiento, y para las áreas rurales de Caucasia, Cáceres, Nechí, Tarazá y El Bagre, el acuífero constituye su única fuente de abastecimiento. En la zona de estudio, prevalecen los usuarios de tipo residencial, la actividad ganadera por ser una de las principales actividades económicas de la subregión, también demanda gran cantidad de agua subterránea; son también usuarios de este recurso hídrico, los centros educativos, las entidades de salud, el comercio y aquellos lugares donde se presentan áreas de siembra de productos agrícolas.

La explotación que se hace del agua subterránea en El Bajo Cauca antioqueño no obedece a un plan de uso y protección, los habitantes de esta subregión han encontrado en el subsuelo la posibilidad de autoabastecerse y satisfacer así la necesidad de recurso hídrico que El Estado no proporciona.

En cuanto al estado legal de las captaciones, si bien a este proceso se le ha dado curso durante los últimos años en la oficina Territorial Panzenú de CORANTIOQUIA, prima la ilegalidad, condición que hace aún más difícil la gestión. Desde más de 2.000 captaciones (pozos y aljibes) se extraen diariamente más de 26.000 m^3 de agua almacenada en los acuíferos de la subregión (Betancur, 2005).

Asumiendo como premisa que las fuentes superficiales de agua en El Bajo Cauca no son, definitivamente, aptas para llegar a satisfacer las necesidades para abastecimiento y consumo en los municipios de Caucasia y Nechí, y que son limitadas para El Bagre, Cáceres y Zaragoza, la evaluación de la demanda de agua subterránea, deberá dar cuenta de análisis prospectivos que consideren el crecimiento poblacional y económico.

El uso que se da al agua subterránea en los aljibes se concentra principalmente en el abastecimiento doméstico (62,3%), el cual comprende la cocción de alimentos, bebida y aseo. Las captaciones destinadas al abastecimiento público (11,1%) cumplen también estas funciones. El segundo renglón de importancia es la ganadería con un 13,2%, los demás usos presentan porcentajes inferiores al 10%. En el caso de los pozos, el principal uso que se le da al agua subterránea es el abastecimiento doméstico (26,2%), la irrigación ocupa el 18,9%, el abastecimiento público el 17,1%, la recreación un 2,2% y los demás usos no se encuentran especificados. El agua de los manantiales se usa en igual porcentaje en la ganadería y el abastecimiento doméstico y un 8,4% se destina para irrigación.

RIESGOS ASOCIADOS AL AGUA SUBTERRÁNEA

5

Con toda la complejidad que el tema de Riesgo (o riesgos) conlleva, puede realizarse una primera aproximación a este tema en materia de agua subterránea en El Bajo Cauca antioqueño pensando en tres circunstancias: i) riesgo por contaminación, ii) riesgo por desabastecimiento, y iii) riesgo asociado a cambio ambiental.

5.1 RIESGO POR CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

En América Latina cuando se hace referencia a los tema de la protección del recurso hídrico subterráneo o de la protección de las fuentes de agua subterránea, se citan como referente los trabajos realizados por Foster e Hirata en 1987 y 1991, por Vrba y Zaporozec, 1994, o por Foster et al., 2002. Estos trabajos giran en torno a tres elementos fundamentales: vulnerabilidad, carga contaminante y riesgo. La evolución de los conceptos queda claramente manifiesta en Foster et al., 2002, cuando empiezan a delimitar dentro del concepto de riesgo dos aspectos diferentes: el del peligro y el del riesgo propiamente dicho.

El peligro de contaminación del agua subterránea puede definirse como la probabilidad de que un acuífero experimente impactos negativos a partir de una actividad antrópica dada, hasta un nivel tal que el agua subterránea se torne inaceptable para el consumo humano. Este peligro puede ser determinado considerando la interacción entre la carga contaminante sub-superficial que es, será o podría ser aplicada en el subsuelo como resultado de las actividades humanas y la vulnerabilidad intrínseca del acuífero a la contaminación (Foster et al., 2002).

La vulnerabilidad intrínseca está referida a la susceptibilidad del sistema a ser adversamente afectado por una carga contaminante. La carga contaminante involucra un conjunto de actividades (desarrollo urbano, agricultura, ganadería, industria, minería, e incluso accidentes ambientales) que puedan llegar a constituir una amenaza para la calidad del agua subterránea, llegando a afectar la salud humana o las condiciones de equilibrio de los ecosistemas.

Por lo tanto, la identificación y clasificación de aquellas actividades potencialmente contaminantes y su interacción con la vulnerabilidad intrínseca del medio acuífero, permiten estimar el peligro a la contaminación del agua subterránea.

El peligro de contaminación del agua subterránea, no tiene en cuenta los impactos potenciales en la población humana o en los ecosistemas acuáticos que dependen del acuífero, ni la dificultad respecto al valor económico del recurso hídrico subterráneo. Una diferenciación semejante en relación con los conceptos de peligro y riesgo está implícita en Nguyet, V. T. y Goldscheider, N., 2006, al considerar que el riesgo de contaminación del agua subterránea tiene en cuenta diferentes aspectos: la presencia y ocurrencia de la amenaza, la vulnerabilidad y en algunos casos, la importancia o valor (costo) del agua subterránea.

El concepto de riesgo tiene diversas acepciones según el campo en que sea empleado, como por ejemplo, en la economía, en la epidemiología o en el de los riesgos naturales. Más allá de esta cuestión y sus particularidades, existe un denominador común en todos ellos que es considerar la probabilidad de ocurrencia de un evento, su magnitud y frecuencia (la peligrosidad o amenaza) y el daño que éste puede producir.

En el diagrama de la Figura 26 se muestran las variables asociadas al riesgo y se sintetiza un método para la evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea.

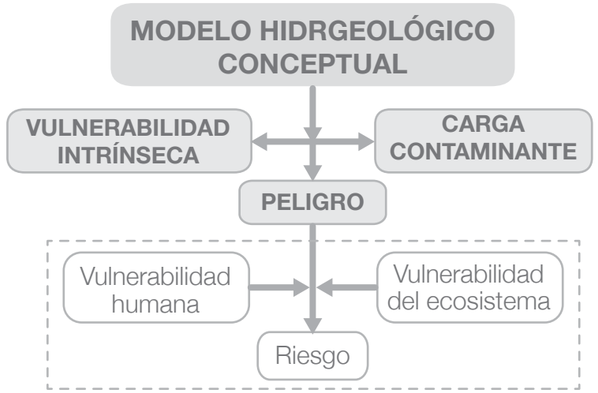


Figura 26. Diagrama para la evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea.

El riesgo estará definido por dos variables: peligro, y vulnerabilidad de la población expuesta al mismo. En Montoya y Gaviria (2011) se describe en detalle el procedimiento para efectuar esta interacción.

A partir del peligro y la determinación de la vulnerabilidad humana, se puede lograr una aproximación a la evaluación del riesgo generado por los impactos que puede sufrir la población y el ecosistema, que se benefician o dependen del agua subterránea. Además, el impacto de un evento de contaminación del agua subterránea sobre la población depende de la vulnerabilidad de la misma, la cual hace referencia a las características que le impiden o dificultan afrontar y adaptarse a un cambio del ambiente.

Para la determinación del riesgo a la contaminación del agua subterránea, se tiene en cuenta información técnica como resultado de una evaluación hidrogeológica y se relaciona directamente con los componentes físicos, sociales, económicos, educativos, políticos, culturales e institucionales de cada población. Uno de los objetivos de dicha determinación contribuye a plantear medidas de gestión que contribuyan a la protección del agua subterránea, en términos de calidad y de alguna manera aportar al mejoramiento de la calidad de vida de la población. Además, los análisis de riesgo constituyen un instrumento que permite la caracterización de los efectos adversos potenciales y su probabilidad de ocurrencia, lo que permite identificar, evaluar, seleccionar e implementar acciones para reducirlos.

Teniendo en cuenta que con la evaluación del peligro se obtienen tantos mapas, como actividades contaminantes se consideren, y que con ello se producen igual número de mapas de riesgo, en Montoya y Gaviria, 2011 se propone una manera de adoptar un único mapa mediante la concepción del riesgo crítico, entendido este como aquel que extrae de cada mapa, por actividad, la condición más crítica para sumarla luego en un único mapa final.

5.1.1 Vulnerabilidad intrínseca

La vulnerabilidad intrínseca de un acuífero representa la susceptibilidad que el sistema físico pre-

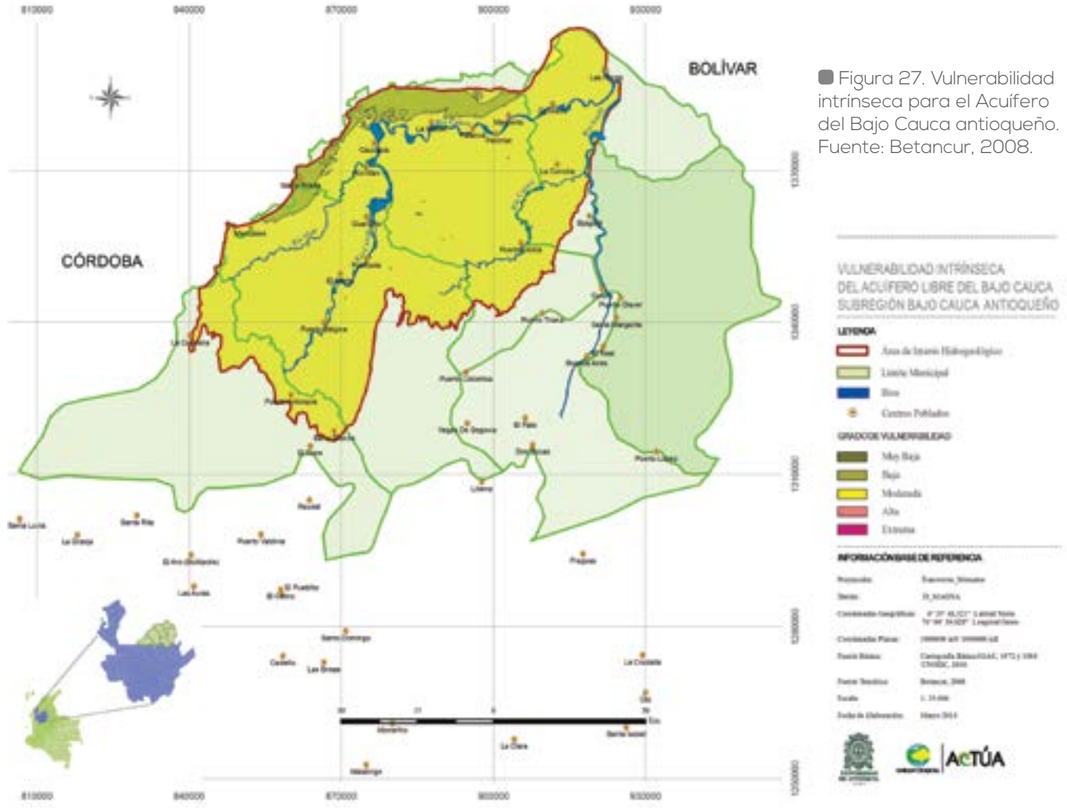


Figura 27. Vulnerabilidad intrínseca para el Acuífero del Bajo Cauca antioqueño. Fuente: Betancur, 2008.

senta para ser adversamente afectado por una carga contaminante; siendo una condición que depende de las características del sistema natural, las diferentes metodologías de índice y superposición involucran para su evaluación variables tales como: profundidad del nivel freático, condiciones texturales del suelo, naturaleza de la roca, cantidad de agua en el acuífero. La metodología **DRASTIC** aplicada y validada en El Bajo Cauca antioqueño involucra siete variables, las cuales con sentido de acróstico tiene el siguiente significado: D – Depth water table (Profundidad del nivel freático bajo la superficie del terreno), R – Net Recharge (Recarga neta que recibe el acuífero), A – Aquifer media (Litología y estructura del medio acuífero), S – Media Soil (Tipo de suelo), T – Topography (Topografía del terreno), I – Impact of vadose zone (Impacto de la zona no saturada o vadosa) y C – Hydraulic Conductivity (Conductividad hidráulica).

El índice DRASTIC (ID) se calcula multiplicando el peso de cada factor por su calificación y realizando la suma para todos:

ID = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw

r: Valores dentro de cada rango.

w: Factor de peso para cada parámetro.

En la Figura 27, se presenta el mapa de vulnerabilidad obtenido mediante DRASTIC, en él se observan condiciones predominantes con grado moderado, y en algunas zonas -al noroeste- con vulnerabilidad baja (Betancur, 2008).

5.1.2 Carga contaminante

Se presenta aquí el resultado de evaluación de amenazas relacionadas con potencial carga contaminante sobre el acuífero, retomando los resultados sintetizados a partir de Betancur (2008) y los talleres participativos realizados durante la formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero en 2013 y 2014. Las fuentes de contaminación identificadas están asociadas a actividades de: desarrollo urbano, producción agrícola, producción pecuaria, extracción minera y accidentes ambientales; la actividad industrial no es relevante en la zona.

Para El Bajo Cauca, el desarrollo urbano y las actividades agrícola, pecuaria y minera son focos de contaminación difusa por su distribución a lo largo de la zona de estudio; los accidentes ambientales son cargas puntuales.

Desarrollo Urbano

Asociado al desarrollo urbano se dan una serie de actividades que generan potenciales cargas contaminantes al acuífero, éstas están asociadas a las deficiencias en el saneamiento básico y tienen que ver con la inadecuada disposición de aguas residuales, residuos sólidos domiciliarios, residuos orgánicos y residuos peligrosos, también se producen amenazas sobre el acuífero a partir del almacenamiento de combustibles, los sumideros de carreteras y los cementerios. En la Tabla 3, partiendo de la síntesis realizada por Betancur, 2008 y ajustada a la nueva amenaza identificada durante el taller de socialización, se presentan las subclases y causas asociadas a la fuente de contaminación por desarrollo urbano.

Tabla 3. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Desarrollo urbano. Fuente: Betancur, 2008.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN						CAUSAS	AMENAZA
Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5		
DESARROLLO URBANO	Saneamiento básico	Aguas residuales	Zona urbana	Alcantarillado		Mal funcionamiento y poco mantenimiento.	CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS Y LOS SUELOS
						Construcciones deficientes.	
				Lagunas de oxidación		Procesos constructivos y operación deficientes.	
				Plantas de tratamiento	Corriente	Inexistencia de PTAR.	
					Terreno		
				Descarga de aguas residuales	Corriente	Baja cobertura del servicio de alcantarillado.	
					Terreno	Crecimiento urbano acelerado y no planificado.	
					Laguna		
			Zona rural	Alcantarillado		Baja cobertura del servicio de alcantarillado.	
				Lagunas de oxidación		Falta de impermeabilización.	
				Plantas de tratamiento	Corriente	Remoción inadecuada de la carga contaminante.	
					Terreno	Inexistencia de PTAR.	
				Descarga de aguas residuales	Corriente	Baja cobertura del servicio de alcantarillado.	
					Terreno	Falta aplicación de los instrumentos legales establecidos en la Ley para el control de los vertimientos.	

FUENTES DE CONTAMINACIÓN						CAUSAS	AMENAZA
Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5		
DESARROLLO URBANO	Saneamiento básico	Aguas residuales	Zona rural	Descarga de aguas residuales	Laguna		
			Zona urbano - rural	Pozos sépticos		Baja cobertura de pozos sépticos.	
						Mal funcionamiento y falta de mantenimiento de los sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales.	
				Letrinas		Falta aplicación, ejecución o formulación de instrumentos de planeación que contribuyan a la protección de las aguas subterráneas.	
				Zanjas		Débil gestión hídrica por parte de las comunidades y actores en general.	
		Residuos sólidos	Zona urbana	Relleno sanitario		Producción de lixiviados por disposición inadecuada de los residuos sólidos y mala operación de los rellenos.	
			Zona urbano - rural	Botadero a cielo abierto		Disposición inadecuada de los residuos sólidos.	
						Falta de cultura ciudadana.	
				Excavación		Falta control por parte de las autoridades ambientales.	
				Corriente superficial			
				Aljibe			
	Almacenamiento de combustibles	En superficie				Tanques antiguos o deteriorados.	
		Enterrados				Derrames por accidente.	
	Sumideros en carreteras					Mal funcionamiento y mala construcción.	
	Operación de cementerios					Operación inadecuada cementerios.	

Producción Agrícola

La principal fuente difusa de contaminación de las aguas subterráneas es la agrícola, la cual produce contaminación debido al uso de fertilizantes y herbicidas. La infiltración de fertilizantes puede ocasionar una entrada adicional de nitrógeno al agua subterránea.

La contaminación por la actividad agrícola está relacionada con el tipo de cultivos y la manera como se realizan éstos en la subregión, mediante agricultura extensiva o como cultivos de pancoger, en ambas circunstancias se suelen aplicar plaguicidas, fertilizantes o regar con aguas residuales; el riego se puede hacer por aspersión o por irrigación. Cualquier caso tienen asociadas su causa y su impacto sobre el recurso hídrico subterráneo. Esta situación se resume en la Tabla 4 (Betancur, 2008).

Tabla 4. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Actividad agrícola. Fuente. Betancur, 2008.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN						CAUSAS	AMENAZA
Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5		
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA	Cultivo extensivo	Plaguicida	Aspersión			La aplicación incontrolada de agroquímicos (pesticidas y fertilizantes orgánicos e inorgánicos). Falta educación y fomento para la implementación de prácticas de cultivos adecuadas. Falta aplicación y control del Plan ordenamiento territorial.	Contaminación de las aguas subterráneas por infiltración de los residuos provenientes de la actividad agrícola y/o por escorrentía o descarga directa a las corrientes.
			Irrigación				
		Fertilizante	Aspersión				
			Irrigación				
		Aguas residuales	Aspersión				
			Irrigación				
	Cultivo de pancoger	Plaguicida	Aspersión				
			Irrigación				
		Fertilizante	Aspersión				
			Irrigación				
		Aguas residuales	Aspersión				
			Irrigación				

Producción pecuaria

La actividad pecuaria comprende las clases ganadera, avícola, piscícola y porcícola. La ganadería puede ser extensiva, o de pocas cabezas; y las actividades avícolas y porcícola pueden corresponder a un propósito comercial o a un quehacer familiar. En todos los casos los excrementos pueden ser usados como abono. La ganadería ocasiona efluentes al suelo y de allí al acuífero. En la Tabla 5 se muestra las subclases en las que se divide la actividad pecuaria y las causas de la contaminación asociadas a estas fuentes.

Tabla 5. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Actividad pecuaria.. Fuente. Betancur, 2008.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN						CAUSAS	AMENAZA
Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5		
PRODUCCIÓN PECUARIA	Ganadera	Extensiva	Efluente lagunas			Manejo inadecuado de los residuos líquidos y sólidos provenientes de la actividad pecuaria. Falta aplicación y control del Plan Ordenamiento Territorial. Actividad soporte de la economía regional realizada por dueños de grandes predios y con poderes económicos que dificulta el control de su expansión.	Contaminación de las aguas subterráneas por la descarga de residuos sólidos y líquidos provenientes de la actividad pecuaria a los suelos o corrientes.
			Efluente el suelo				
			Efluente corrientes superficiales				
		Pocas cabezas	Efluente lagunas				
			Efluente el suelo				
			Efluente corrientes superficiales				
		Excremento como abono					
	Avícola	Industrial					
		Casera					
		Excremento como abono					
	Porcícola	Industrial					
		Casera					
		Excremento como abono					
	Piscícola	Industrial					
		Casera					
		Excremento como abono					

Actividad minera

La minería en sus diferentes tipos y procesos genera una serie de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos que van al suelo o directamente a las aguas superficiales, y luego, son llevados a las aguas subterráneas, ya sea por infiltración de lixiviados o directamente por el intercambio con las corrientes superficiales. Para el análisis la actividad se divide en minería de metales, cantera, carbón y petróleo (subclase 1). La de metales se subdivide a cielo abierto o subterránea (subclase 2) (Betancur, 2008). La explotación a cielo abierto demanda grandes cantidades de agua y la utilización de sustancias químicas para la separación de otros materiales. Entre estas sustancias están el mercurio y el cianuro.

Esta actividad ha sido por muchos años la base económica de El Bajo Cauca antioqueño. Para el 2005, la actividad minera dentro de la zona de estudio se presentaba en: Puerto Astilla, Concepción, Las Conchas, Carguero, Vijagual y Los Delirios. Sin embargo, la subregión ha sido intervenida por la actividad minera durante muchos años y asociado a esto posiblemente gran parte de la zona de estudio puede presentar un potencial de generación de carga contaminante a las aguas subterráneas (Gaviria, 2005). La minería que para el 2005, se tomó para su análisis como actividad heredada, actualmente se ha reactivado en la zona. En la Tabla 6 se muestran las subclases y causas de la contaminación por actividad minera.

Tabla 6. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Actividad minera.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN						Causas	Amenaza
Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5		
EXTRACCIÓN MINERA	Metales	Cielo abierto				Uso indiscriminado de mercurio y otros metales que son perjudiciales para la salud. Existencia de minería ilegal. Falta aplicación y control del Plan ordenamiento territorial y de la actividad minera.	Contaminación de las aguas subterráneas y superficiales por descarga residuos provenientes de la actividad minera.
		Subterránea					
	Cantera						
	Carbón						
	Petróleo						

Accidentes Ambientales

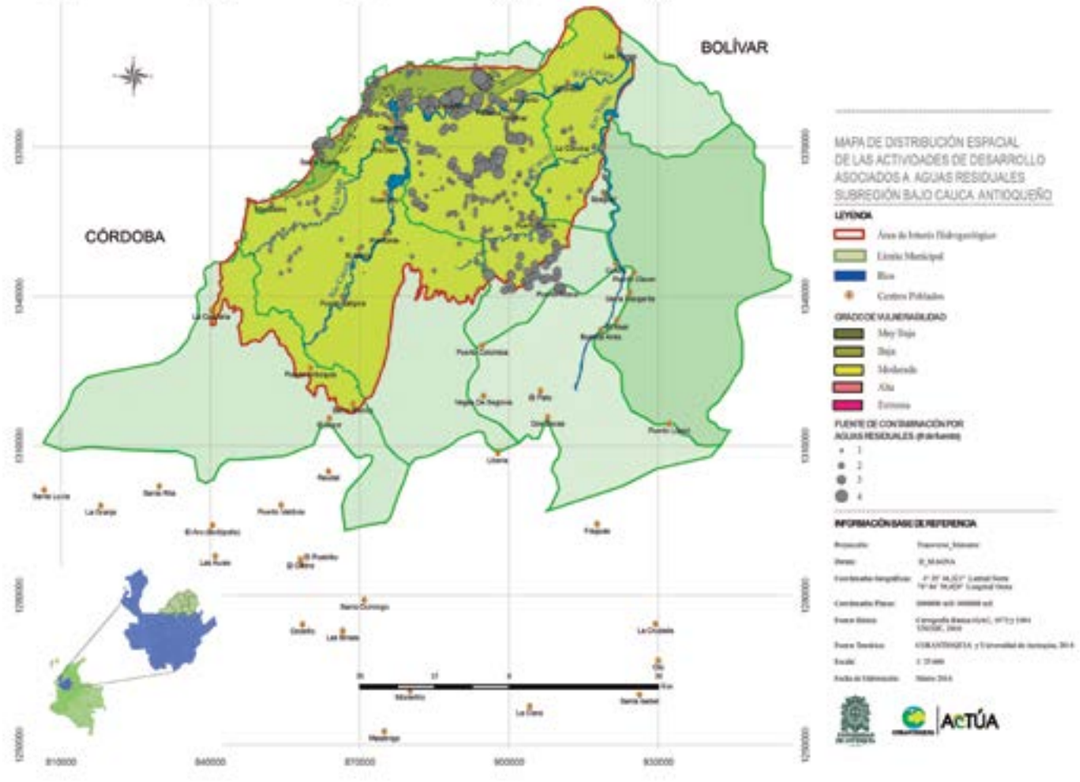
Pueden ocasionarse por derrames asociados a posibles accidentes en carreteras de vehículos que transportan combustibles o por atentados o rompimiento de los oleoductos que pasan por la subregión. También por la presencia de animales, tanto vivos como muertos, en el interior de las captaciones de aguas subterráneas y la presencia de materiales extraños como palos, latas de zinc, etc. Otro aspecto a considerar dentro de esta clase sería el sacrificio y posterior entierro de animales enfermos, los cuales no son incinerados debido a la falta de infraestructura que permita el manejo adecuado de estos casos dentro de la subregión.

En la Tabla 7 se muestra la división de la fuente de contaminación en subclases y las causas por las cuales se puede presentar la amenaza.

Tabla 7. Subclases y causas de la fuente de contaminación. Accidentes ambientales. Fuente. Betancur, 2008.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN						Causas	Amenaza
Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5		
ACCIDENTES AMBIENTALES	Derrames	Lagunas				Construcción inadecuada y falta mantenimiento de las captaciones. Presencia de oleoductos en la subregión. Prácticas de tratamiento a animales muertos.	Contaminación por derrames ocasionados por accidentes.
		Suelo					
		Corrientes superficiales					
	Presencia de animales	Muertos					
		Vivos					
	Materiales extraños						

Figura 28. Peligro de contaminación del agua subterránea por actividades de desarrollo urbano. Fuente: CORANTIOQUIA - Universidad de Antioquia, 2014.



5.1.3 Peligro

De la interacción entre vulnerabilidad intrínseca y carga contaminante se obtienen los mapas de peligro de contaminación del agua subterránea, que se presentan en la Figura 28, la Figura 29 y la Figura 30, donde se puede observar que las distintas actividades que están generando carga contaminante al acuífero libre, le imprimen condiciones de peligro fundamentalmente altas.

Figura 29. Peligro de contaminación del agua subterránea por actividades agropecuarias. Fuente: CORANTIOQUIA - Universidad de Antioquia, 2014.

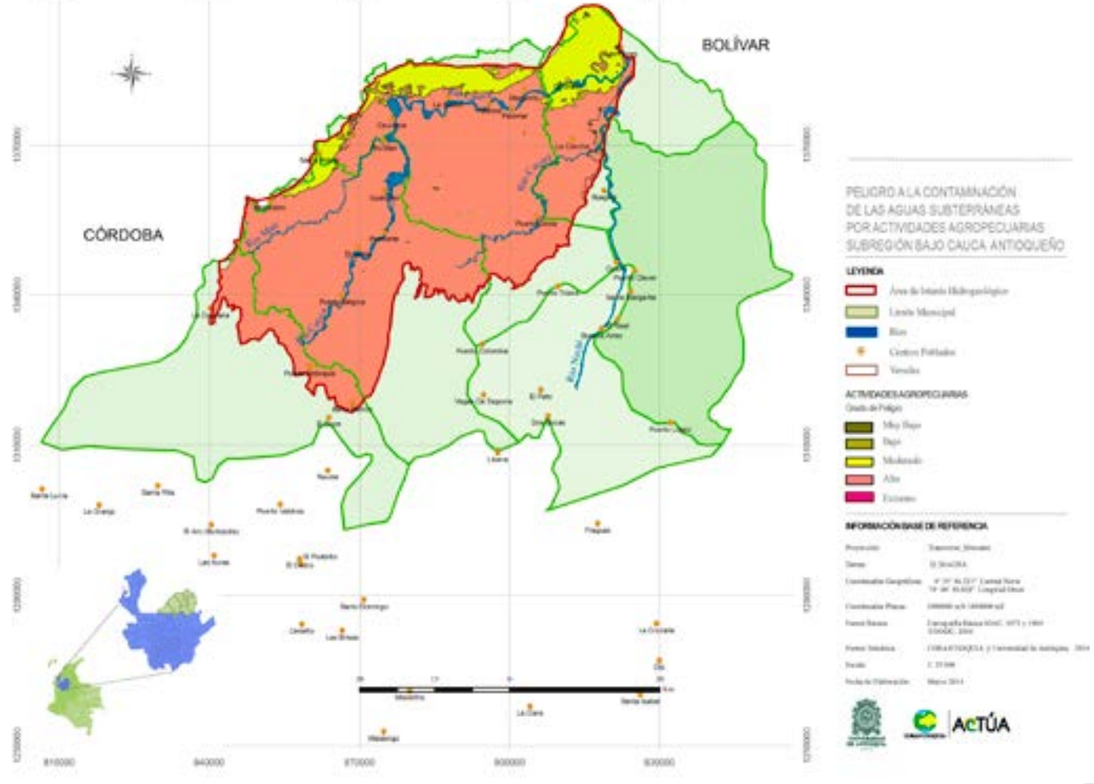
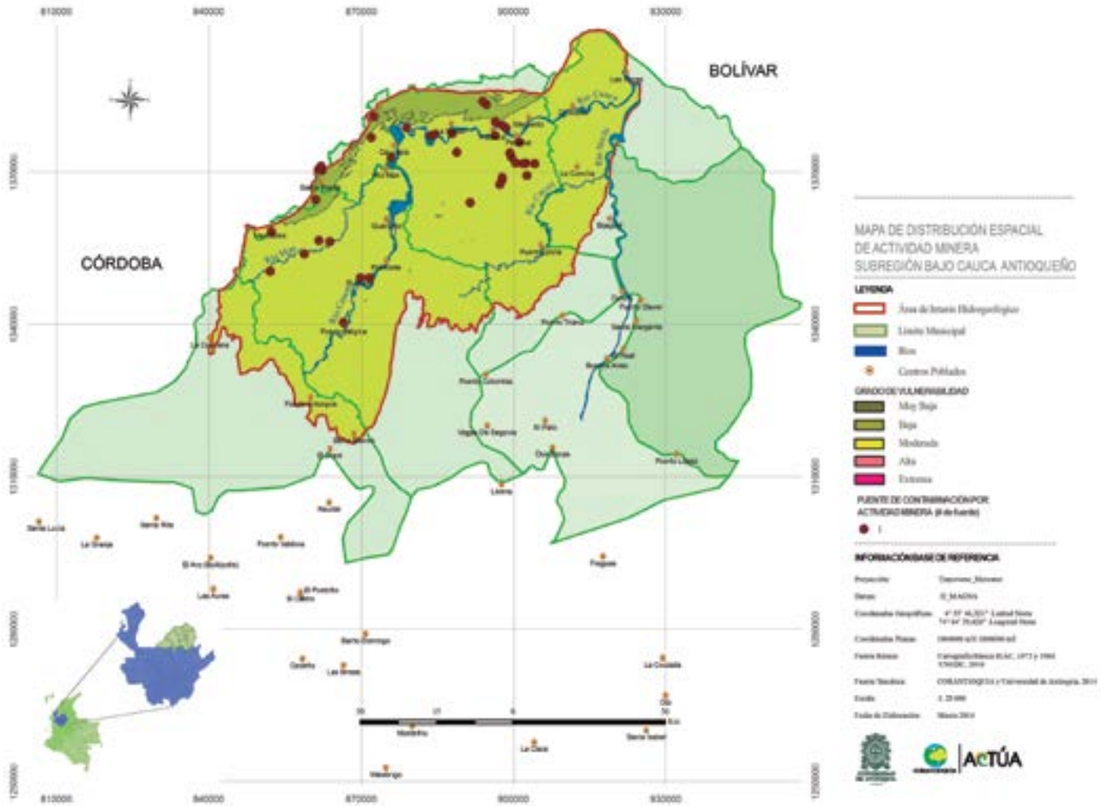


Figura 30. Peligro de contaminación del agua subterránea por actividad minera.. Fuente: CORANTIOQUIA - Universidad de Antioquia, 2014.



5.1.4 Vulnerabilidad humana

Asimilando la vulnerabilidad humana a la susceptibilidad del ser humano a ser adversamente afectado por consumir o usar agua en condiciones de calidad no apta, se retoma la metodología descrita en Montoya y Gaviria (2011), en la cual se define un Índice de Vulnerabilidad Humana (VH), que corresponde a la suma ponderada de los componentes Exposición (Exp), Fragilidad Socioeconómica (FS) y Falta de Resiliencia (FR). Éste se estima a partir de la siguiente ecuación:

VH = 0,45 x Exp + 0,33 x FS + 0,22 x FR

La Exposición está directamente relacionada con la densidad de población dependiente del recurso hídrico subterráneo, que puede verse afectada ante un evento de conminación del acuífero.

La Fragilidad Socioeconómica se estima a partir de las variables: cobertura en el servicio de acueducto, el nivel de educación, el nivel de ingresos, la cobertura en salud y la cultura del agua.

La Falta de Resiliencia se evalúa mediante las variables: ordenamiento, educación ambiental, prevención, fuentes alternas de abastecimiento y organización social. Está relacionada con la capacidad de respuesta y recuperación de la población ante la contaminación del agua subterránea.

El Índice de Vulnerabilidad Humana es una medida cualitativa de la vulnerabilidad con base a unos rangos establecidos que permiten su valoración como: extrema, alta, moderada, baja y muy baja.

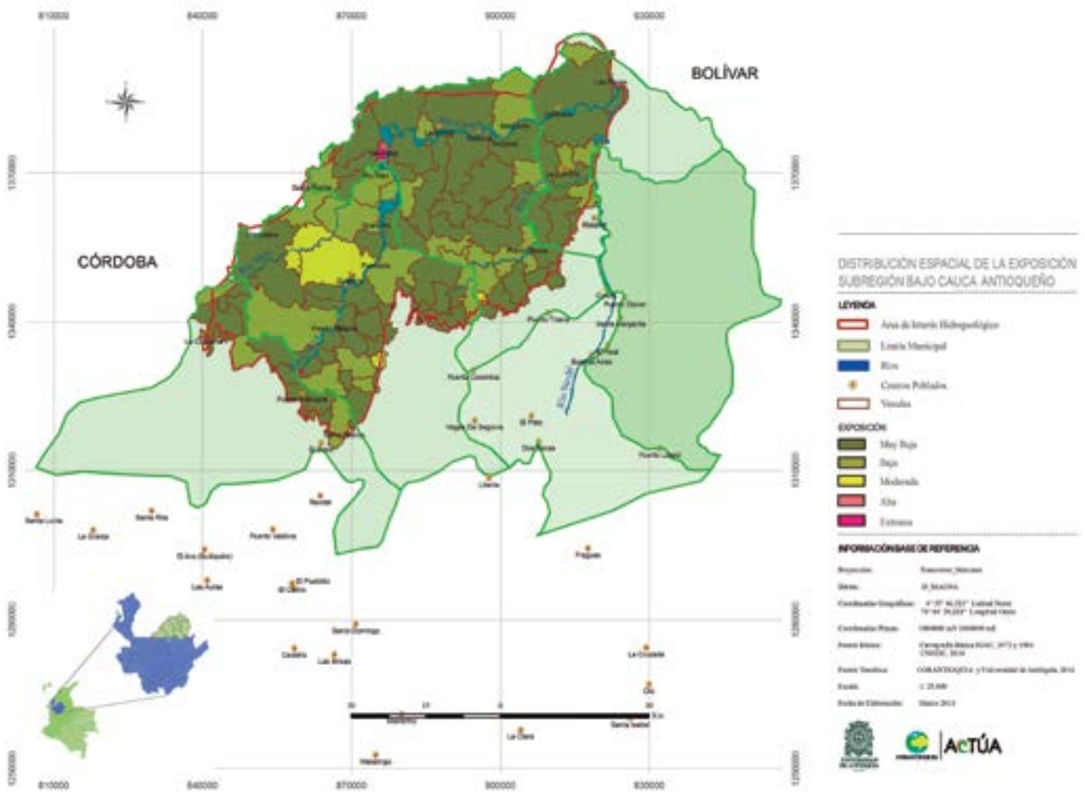
Para la aplicación dentro de este estudio de la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad humana en la subregión de El Bajo Cauca antioqueño, donde el agua subterránea es un recurso estratégico, se definió como unidad espacial de análisis la vereda. La información correspondiente a las variables necesarias para calcular cada uno de los factores que intervienen en el cálculo de la vulnerabilidad humana fue tomada de diferentes fuentes: i) Atlas Veredal de Antioquia, 2007, ii) Censo del 2005, iii) oficinas municipales de Caucasia, Cáceres, El Bagre, Tarazá y iv) base de datos del trabajo de investigación de Gaviria 2005.

Dentro del área objeto de estudio se identificaron 102 veredas, localizadas en jurisdicción de los municipios de Caucasia, Nechí, Tarazá, El Bagre y Cáceres. Los resultados obtenidos para el Índice de Vulnerabilidad Humana, así como el de cada uno de los componentes que la conforman, se describen a continuación.

Exposición:

De acuerdo con los datos de densidad de población, en el área rural de los municipios de El Bajo Cauca, la Exposición se categoriza predominantemente entre las clases muy baja a baja. En la Figura 31, se muestra la distribución espacial de los resultados respectivos al componente Exposición.

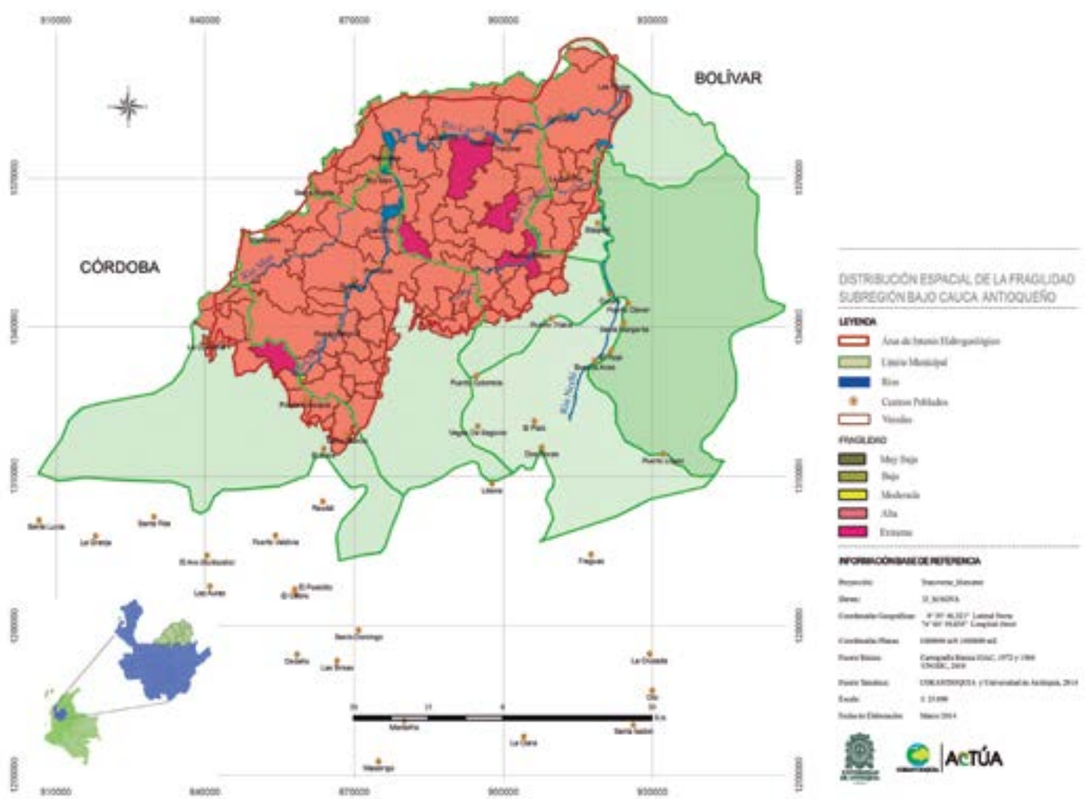
Figura 31. Distribución espacial de la Exposición en la zona de estudio. Fuente: CORANTIOQUIA - Universidad de Antioquia, 2014.



Fragilidad Socioeconómica:

En la Figura 32 se muestra la distribución espacial de los resultados obtenidos para la Fragilidad Socioeconómica, donde la zona urbana de Cáceres presenta clase moderada, la de Caucasia, baja, y el resto de las unidades de análisis están entre alta y extrema.

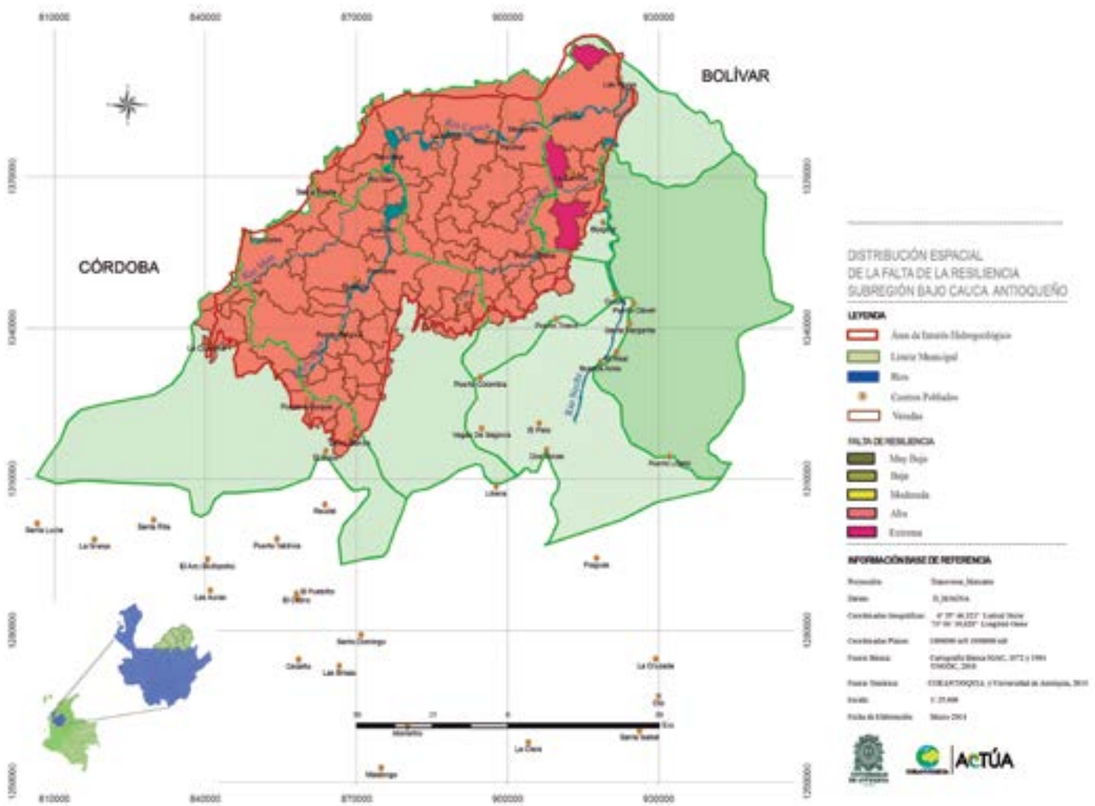
Figura 32. Distribución espacial de la Fragilidad Socioeconómica en la zona de estudio.. Fuente: CORANTIOQUIA - Universidad de Antioquia, 2014.



La Falta de Resiliencia:

En la Figura 33, se muestra la distribución espacial de la Falta de Resiliencia donde se observa que sólo tres unidades presentan clase extrema y el resto alta.

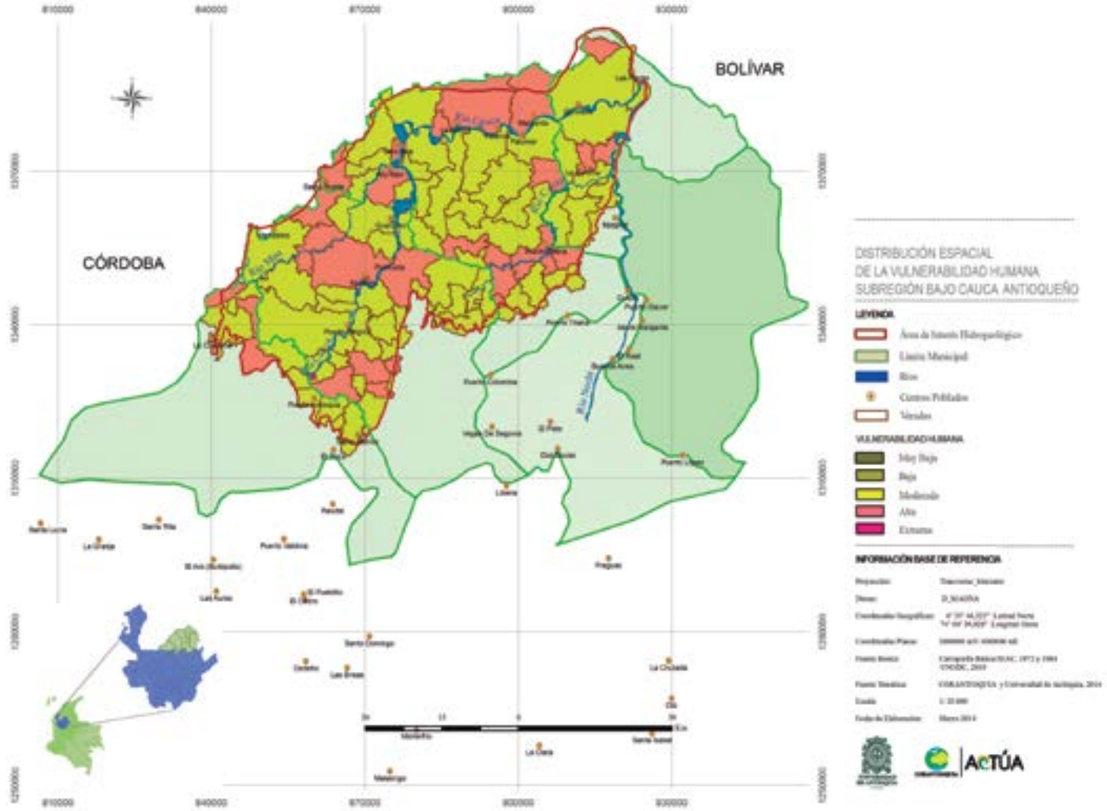
Figura 33. Distribución espacial de la Falta de Resiliencia en la zona de estudio. Fuente: CORANTIOQUIA - Universidad de Antioquia, 2014.



Vulnerabilidad Humana:

Según los resultados obtenidos en la evaluación del Índice de Vulnerabilidad Humana, claramente se observa que sólo una unidad de análisis, localizada en el casco urbano de Cáceres presenta clase extrema, en el resto del territorio se presentan categorías de vulnerabilidad alta o moderada (Figura 34).

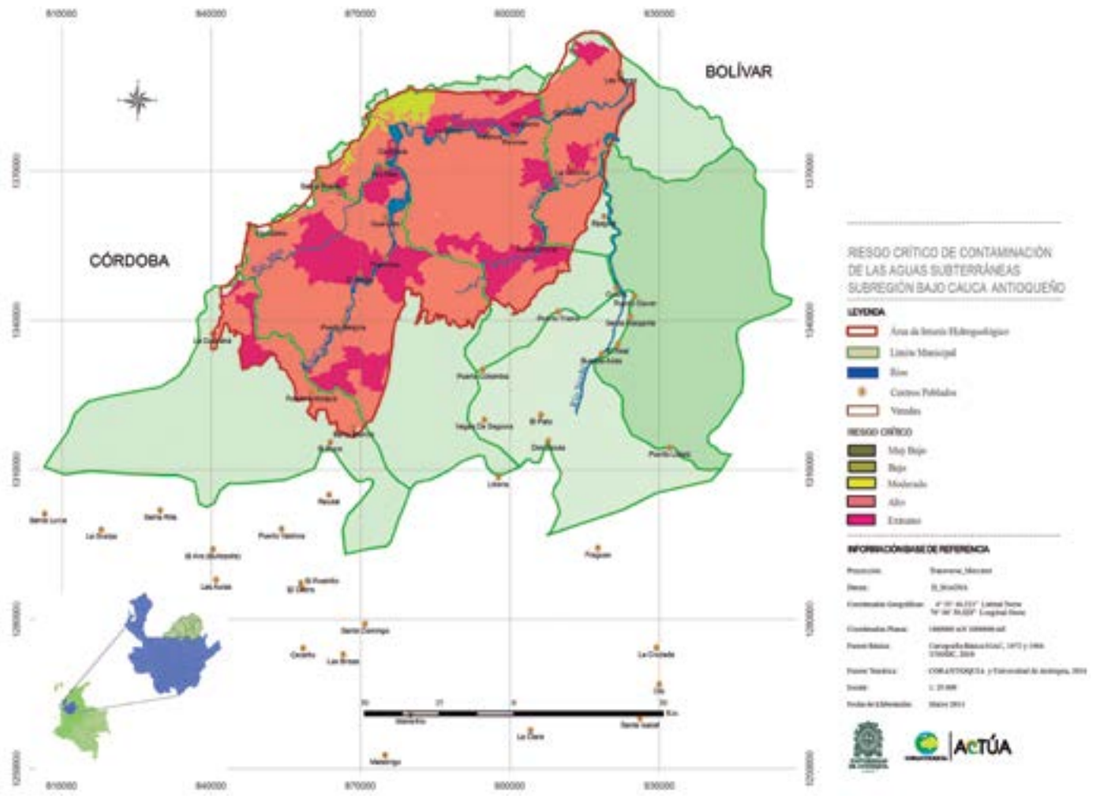
Figura 34. Distribución espacial de la Vulnerabilidad Humana en la zona de estudio. Fuente: CORANTIOQUIA - Universidad de Antioquia, 2014.



5.1.5 Riesgo crítico por contaminación del agua

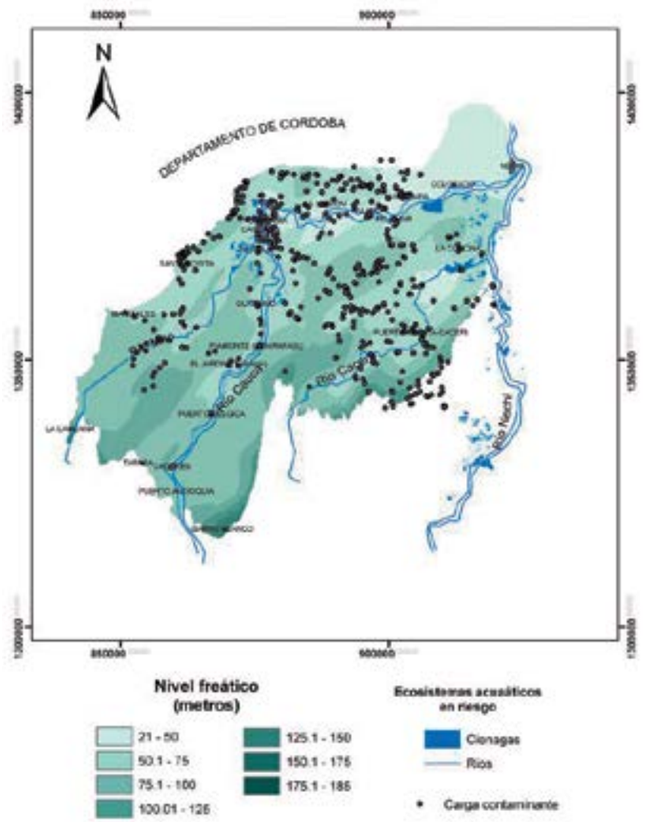
Partiendo de los mapas de peligro a la contaminación de las aguas subterráneas asociados a actividades urbanas, agropecuarias y de extracción minera, obtenidos por Betancur (2008), incorporando los resultados obtenidos para la evaluación de la vulnerabilidad humana, y aplicando el concepto de Riesgo Crítico expuesto por Montoya y Gaviria (2011) se obtiene el primer mapa de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas para el acuífero libre en la jurisdicción de la Dirección Territorial Panzenú de CORANTIOQUIA (Figura 35). Se observa que el componente denominado vulnerabilidad humana, superpuesto a una serie de condiciones de peligro que varían entre altas y moderadas, ponen de manifiesto las condiciones críticas de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas que se dan en El Bajo Cauca antioqueño, al tener como resultado una condición de riesgo alta en la mayor parte de las veredas, el riesgo extremo se presenta en menor proporción y el riesgo moderado en una proporción más pequeña, presentándose en tres de las veredas evaluadas.

Figura 35. Riesgo Crítico de contaminación del agua subterránea en el Acuífero Libre del Bajo Cauca antioqueño. Fuente: CORANTIOQUIA - Universidad de Antioquia, 2014.



Según Betancur, 2008, no se ha hecho una valoración ambiental de los ecosistemas lóticos de El Bajo Cauca, por lo tanto no hay un soporte documental para priorizar las corrientes de agua que circulan por la región en virtud de su riqueza ecológica. Tal vez los ríos Man y Cacerí, este último en sus partes alta y media, puedan constituir importantes hábitats de peces y otras especies. De otro lado el complejo sistema de humedales de El Bajo Cauca, con más de 150 cuerpos lénticos de agua, han sido declarados áreas de protección en los términos establecidos dentro de la Política Nacional de Humedales, generada a partir de la adhesión de Colombia a la convención RAMSAR. Es bien sabido que mediante el flujo del agua subterránea se mantiene el caudal base de las corrientes en épocas de estiaje, sin embargo los aportes al caudal base de los ríos Cauca, Nechí, Man y Cacerí no han sido cuantificados; pero si son claras las evidencias que indican que los humedales son alimentados y sostenidos por su interacción con las aguas freáticas (Universidad de Antioquia, 2007). Si se pretende hacia el futuro pensar el riesgo de contaminación del agua subterránea del acuífero libre como elemento que pueda impactar los ecosistemas acuáticos de la región, las imágenes de peligro mostradas en el numeral anterior (Figura 28, Figura 29 y Figura 30) y la que se presenta en la Figura 36 indican que ese riesgo es evidente, ya que el sentido de flujo de agua subterránea es claro en mostrar como las corrientes y cuerpos lénticos son receptores de ellas. El riesgo para los humedales es inminente y de seguro no es bajo.

Figura 36. Ecosistemas acuáticos y su relación con el flujo de agua subterránea en el área de estudio. Fuente: Betancur, 2008.



5.2 RIESGO POR DESABASTECIMIENTO Y RIESGO POR CAMBIO AMBIENTAL

Las otras visiones del riesgo sobre el sistema hidrogeológico de El Bajo Cauca, están por construir e investigar, y ese proceso partirá de la elaboración de un marco conceptual, y de un indagar y construir conocimiento entorno a la realidad del cambio ambiental, y dentro de él, del cambio climático en la región.

No está, esta región de la geografía colombiana dentro del contexto de las áreas donde se prevea sequía, pero si se tienen evidencias tangibles de la conexión del sistema local de la planicie con el regional de Los Andes y de la cuenca entera del río Cauca, más de un episodio de inundación local asociado a lluvias regionales se han registrado en El Bajo Cauca por efectos de aportes regionales de agua subterránea que ocasionan ascensos en el nivel freático.

Poco más que nada se sabe sobre los efectos que sobre el sistema hidrogeológico, tiene el cambio en el uso del suelo al perturbar el medio con la actividad de minería a cielo abierto, pero es seguro que al remover suelo y subsuelo se alteran propiedades hidráulicas, y se desconfigura el carácter de las unidades hidrogeológicas intervenidas y en caos se remueven los embalses subterráneos.

La conexión agua superficial - agua subterránea es evidente en El Bajo Cauca, los cientos de humedales de la región son testigos tangibles de ella, y los efectos que sobre los ecosistemas estratégicos llegue a tener la regulación de caudales a los que se someta el río Cauca según la operación de Hidroltuango, son totalmente impredecibles.

De la evaluación del riesgo, tiene que hacer parte la valoración económica de recursos, bienes y servicios, tanto para el agua, como para los ecosistemas, para el hombre y para sus bienes. Este camino no se ha empezado a transitar.

5.2.1 Amenazas por desabastecimiento

Las afectaciones ocasionadas por actividades extractivas –tanto de agua superficial o subterránea, como de productos minerales- dentro del dominio espacial de un sistema hidrogeológico, pueden traducirse en una amenaza por desabastecimiento en la medida en que comprometan significativamente la cantidad de agua involucrada y la dependencia que la comunidad humana y los ecosistemas tengan de ella.

La Figura 37–adaptada de los esquemas de flujo regional propuestos por Tóth- ilustra estas circunstancias, en las cuales se ven las conexiones que entre las fronteras de un sistema se generan al considerar las rutas a través de las cuales se mueve el agua.

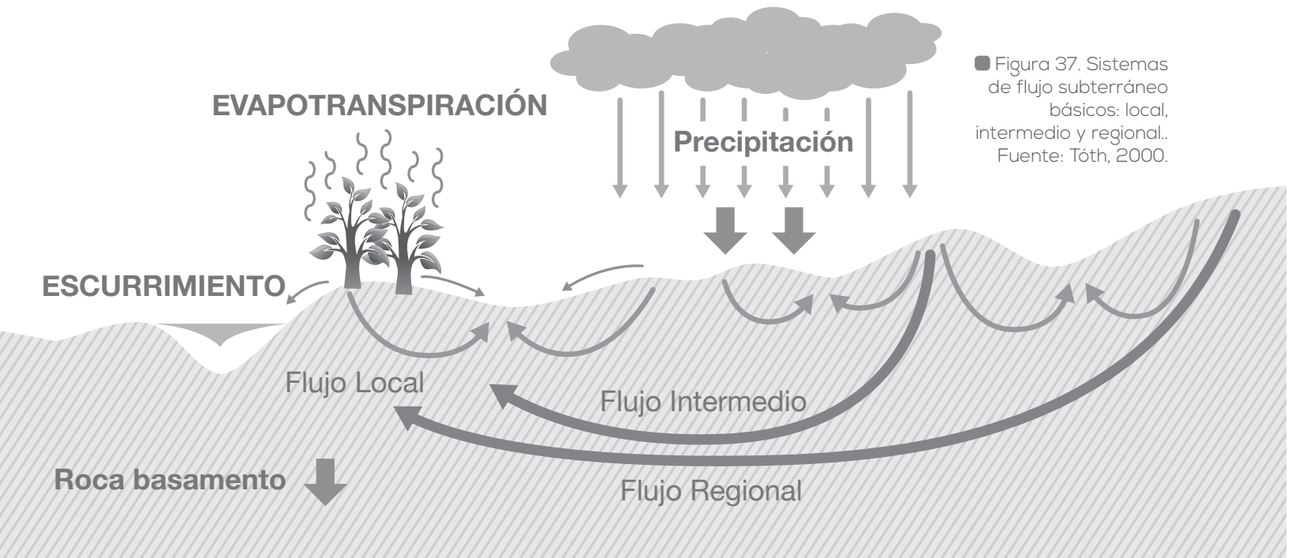


Figura 37. Sistemas de flujo subterráneo básicos: local, intermedio y regional.. Fuente: Tóth, 2000.

De otra parte las intervenciones que afecten la magnitud de la recarga también pueden incluirse como factores causantes de desabastecimiento. En este sentido, en los ejercicios participativos de los talleres 1 y 2, se identificaron algunas actividades antrópicas que pueden afectar directamente o indirectamente la magnitud de la recarga del Acuífero de El Bajo Cauca antioqueño, ya sea porque afecta los ecosistemas que hidráulicamente están conectados con el mismo o porque disminuye la infiltración de los suelos en las zonas de recarga, estas son: i) Construcción de la central hidroeléctrica de Ituango; ii) pérdida de la capacidad de infiltración y retención de aguas lluvias de los suelos en las zonas de recarga del acuífero; iii) crecimiento no controlado de pozos y aljibes; y iv) actividad minera a gran escala.

5.2.2 Amenazas por cambio ambiental

Dentro de las amenazas naturales se deben considerar los cambios ambientales no inducidos por el hombre que afectan el ciclo hidrológico pudiendo disminuir la recarga. Un marco conceptual en torno al tema de las amenazas de carácter natural que podrían llegar a comprometer la oferta o disponibilidad del recurso hídrico subterráneo, resultará sin lugar a dudas a partir de los debates que a nivel mundial se están dando acerca del cambio climático y sus efectos sobre la hidrología. En la medida en que se avance en la construcción y apropiación de estas ideas, se irán proponiendo metodologías que indiquen cuales son las variables a monitorear y la manera de relacionarlas para evaluar las amenazas sobre los sistemas hidrogeológicos.

Con el propósito de dejar plasmada esta necesidad, y comprometer hacia el futuro la elaboración de este componente del diagnóstico dentro del PMAA, se transcriben los siguientes párrafos tomados del texto Cambio Climático y Aguas Subterráneas, Visión para los próximos decenios (Pernía & Fornés, 2008).

A las amenazas derivadas de las cargas contaminantes asociadas a las actividades humanas sobre la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo "… se suma en la actualidad la derivada de los procesos relacionados con el cambio climático. Ya en 1972 la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente señaló la importancia de este fenómeno, promoviendo una serie de acciones dirigidas a mejorar la comprensión de sus causas, tanto naturales como artificiales, esto es, las derivadas de la actividad antrópica. Los sucesivos informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), son jalones en un proceso iniciado hace más de tres décadas."

"En los últimos años, la sensibilidad social ante el cambio climático y el grado de conocimiento científico sobre sus características y previsibles consecuencias, se han incrementado exponencialmente. El cambio climático constituye hoy un tema ampliamente divulgado y sus repercusiones políticas y económicas generan un alto grado de inquietud que contribuye a la movilización de la comunidad científica con objeto de paliar sus efectos. Desde el ámbito de la geología y, en lo que a las aguas subterráneas se refiere, la hidrogeología, dicha movilización es así mismo un hecho constatable."

EL FUTURO DE UN RECURSO INVISIBLE

6

En el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, promulgada por el Gobierno Nacional en 2010, a la luz del Decreto 1640 de 2012 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; en el contexto de la importancia que el agua subterránea supone para la subregión de El Bajo Cauca antioqueño, al ser la única fuente segura de abastecimiento para más de 150.000 personas; y a la luz del empeño que viene poniendo el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en apoyar la gestión del agua subterránea en sistemas estratégicos, dicho ministerio, CORANTIOQUIA y la Universidad de Antioquia mediante el convenio de cooperación, aunaron esfuerzos para formular el Plan de Manejo Ambiental de Acuífero en la jurisdicción de la Dirección Territorial Panzenú.

Un Plan de Manejo Ambiental de Acuífero -PMAA-, es un instrumento de planificación que aborda el conocimiento del sistema acuífero, su evaluación, en términos de la cantidad y calidad del agua almacenada, y la identificación de problemáticas o amenazas asociadas, permite proyectar las medidas de manejo ambiental a través del desarrollo de procesos participativos con las comunidades y demás actores relacionados con el recurso hídrico subterráneo, con el objetivo de realizar un aprovechamiento sostenible de este valioso bien.

El Bajo Cauca antioqueño es ante la mirada de cualquier espectador una región rica en agua, y ante un lector desprevenido, seguramente suena paradójico el mencionar el hecho de que el acceso a agua potable por parte de la población está en el límite del desabastecimiento. Y es que el río Cauca, con caudales de más de 1.200 m^3/s en Caucasia, ha recorrido al llegar a la región más de 1.000 Km de distancia recogiendo corrientes y productos incorporados a ellas por los millones de habitantes asentados en las vertientes de las cordilleras Central y Occidental de Los Andes de Colombia; y los ríos Nechí, Man y Cacerí, han lavado terrenos dedicados a la agricultura, la ganadería y la minería a lo largo de sus cauces y riberas. En El Bajo Cauca antioqueño la única fuente segura de agua para el abastecimiento actual es un acuífero libre de extensión regional, y la única fuente segura de agua hacia el futuro se alberga en el Acuífero Confinado Panzenú ¿Cuánto y hasta donde esta situación es clara en el territorio?, la respuesta no es fácil, ni es única:

Los habitantes de la planicie aluvial de El Bajo Cauca, a fuerza de costumbre, han aprendido a identificar la integralidad del ciclo hidrológico, perciben qué es el agua subterránea, asocian su presencia con la lluvia y distinguen alguna conexión con los ríos y las ciénagas.

La Autoridad Ambiental, viene buscando desde hace más de una década un rumbo certero para hacer gestión integral del recurso hídrico y lograr la sostenibilidad ambiental del acuífero y de los ecosistemas dependientes de él.

Las administraciones municipales y las empresas prestadoras del servicio de acueducto y abastecimiento de agua potable, no han logrado concretar proyectos efectivos para el aprovechamiento del agua subterránea.

La Universidad ha estado atenta -en el marco de su misión institucional- mediante la investigación para contribuir en la generación de nuevo conocimiento, y mediante la extensión social a participar en convenios de cooperación con el ánimo de contribuir en la búsqueda de soluciones a problemas regionales.

Quienes realizan prácticas industriales, agrícolas o mineras, saben que contaminan, se lamentan por ello y quieren encontrar o reencontrar formas “limpias” de actuar.

A lo largo de los capítulos antecedentes ha quedado claramente establecida la condición estratégica de las aguas subterráneas en El Bajo Cauca antioqueño, también se pueden leer hasta aquí los elementos que diagnostican las condiciones del sistema hidrogeológico y de la población de El Bajo Cauca antioqueño.

Pensando en el futuro hay que hablar de planeación, y al hablar de planeación debe pensarse en participación de los actores sociales que habitan el territorio o que deben actuar en pro del ambiente y de la comunidad, debe pensarse en el manejo y conservación de los recursos naturales, en la manera de vivir en el territorio y garantizar la supervivencia y permanencia de las generaciones futuras.

Con la formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero, se ha logrado instaurar un proceso participativo, y se han dado pasos certeros hacia la materialización de lo que debe llegar a ser la participación de los actores sociales en las fases fundamentales -que son las por venir- de Ejecución y Seguimiento al Plan. La necesidad de acceder a agua segura es profundamente sentida por los habitantes de El Bajo Cauca, esta necesidad los motiva a acudir cuando se les convoca y a esperar -con o sin esperanza- respuestas institucionales, esta necesidad, puede motivar un cambio, puede transformarse en conciencia si se transmite el conocimiento, si se educa y si se construyen soluciones. Si se generan expectativas y no se responde a ellas, a la necesidad seguirán el inconformismo y la incredulidad.

A través de las convocatorias y del trabajo conjunto durante los talleres que acompañaron las Fases I y II de formulación del PMAA, se probó que era necesario, y se logró demostrar que es posible crear un escenario para el encuentro, el diálogo y la reflexión; se propiciaron momentos en los que fue posible sumar visones individuales y reconocer la importancia de la visión en equipo. Hay en ello un terreno abonado para construir La Participación: Se ha subido el telón, se tiene escrito el guión, hay que repartir ahora los libretos y mantener a los sujetos en el rol de actores; en este momento se necesita y se espera el: ”ACTÚA”; la orientación y el acompañamiento vendrán de CORANTIOQUIA. Es el momento de instalar la mesa de trabajo a la que se refiere el Decreto 1640 de 2012.

Y queriendo reconocer que el camino recorrido nos ha llevado efectivamente a algún logro y queriendo creer que a futuro es posible un mejor ambiente, podría terminarse esta reflexión citando las palabras con las que Neil de Grasse Tyson abre el capítulo cinco de la serie Cosmos: **“Existe una nave con motores gemelos la ciencia y la imaginación. El cosmos surgió del caos”.**

Durante el análisis de actores realizado para el PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUIFERO de El Bajo Cauca antioqueño, se definieron cuatro sectores claves, se reconocieron las relaciones que los unen, se identificaron roles, intereses e importancia de cada uno (Figura 38). Los sectores identificados por medio de talleres participativos y de un trabajo interdisciplinario con el equipo de aguas subterráneas del grupo GIGA de la Universidad de Antioquia, fueron:

Sector comunitario: Se comprenderá como aquel que integra la representación social que tienen las comunidades de la subregión, en este caso el sector se compone por la asociación de directores comunitarios de El Bajo Cauca, Veedurías y comités comunitarios de salud , Red de mujeres de El Bajo Cauca ,Las Juntas de Acción Comunal, Consejo Municipal de Desarrollo Rural, Grupos Étnicos, Consejo Municipal de Juventud, Grupos ecológicos y Las ONG´s, se consideraron en el sector comunitario teniendo en cuenta que pueden ser aquellas constituidas por miembros de las comunidades o por agentes externos que trabajan por el bienestar de éstas, pero que no están asociadas de manera directa con el sector gubernamental.

Sector Comercial y Productivo: Para el Plan, se comprenderá como aquel que integra en sus actividades económicas, el trabajo pecuario y agrícola,

además de la compra y venta de bienes y servicios, la cual puede ser de carácter formal o informal, por lo anterior los actores sociales que componen este sector son las Asociaciones de Comerciantes, las Asociaciones de Agricultores, las Asociaciones de Ganaderos, las Asociaciones de Pescadores, -OCENSA-, Comercializadores de Combustible, Extractores de Material de Arrastre, Lavaderos de Carros, Hoteles, Restaurantes, Minería informal y Lavaderos de Carros Informales.

Sector institucional: El sector institucional por su parte se comprenderá como aquel que cumple un rol administrativo, organizativo público o gubernamental en la subregión. Los actores sociales identificados en este sector incluyen: la asociación de personeros de El Bajo Cauca, el Consejo Territorial de Planeación, la Gobernación de Antioquia, los organismos de control, los consultores del Plan de Manejo Ambiental Minero, el comité del Plan Departamental de Aguas y la Gerencia de Servicios Públicos, el Consejo Municipal de Desarrollo Rural, la Asociación de Municipios de El Bajo Cauca y Nechí, Administraciones Municipales, Hospitales, Instituciones Educativas, Autoridades Ambientales, CORANTIOQUIA y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Policía Ambiental, Batallón e Iglesias, UMATA (Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria), ANLA (Agencia Nacional de Licencias Ambientales), Ministerios: Minas y Energía, Cultura, Agricultura, Vivienda, IDEAM, EPM, Unidad de Planeación Minero Energética, Agencia Nacional de Minería, Secretaria de Salud Departamental y Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres.

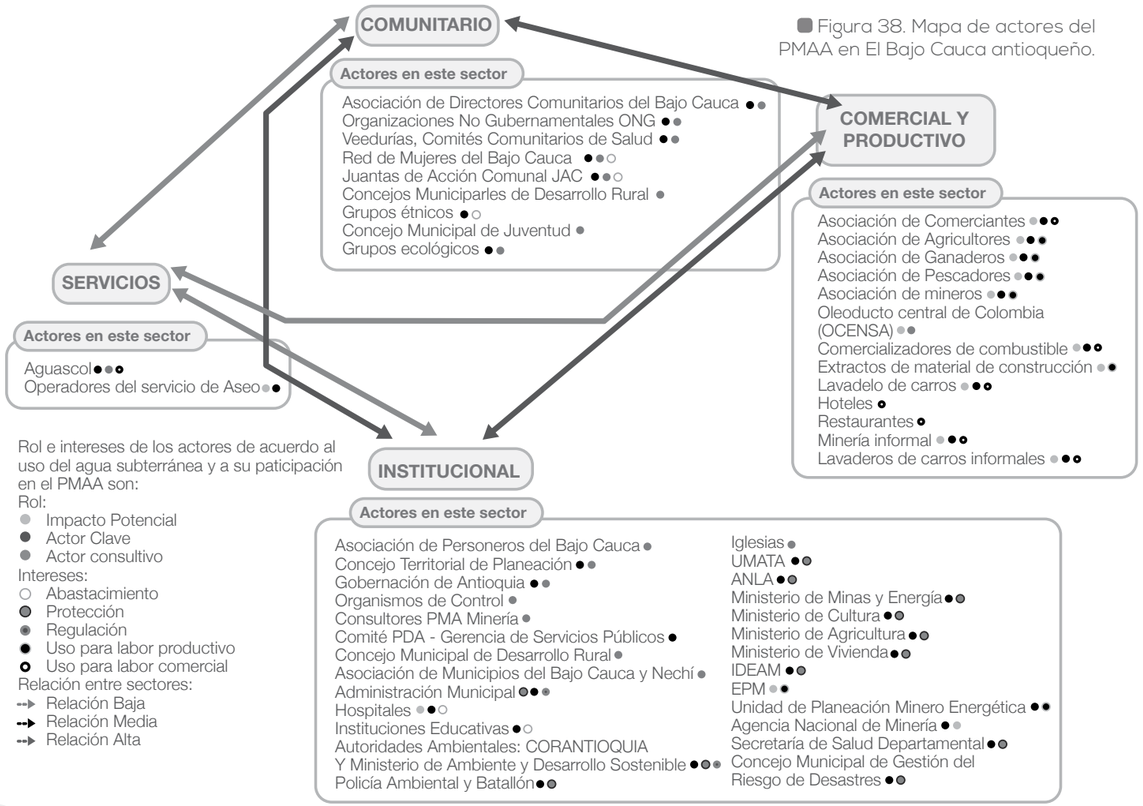


Figura 38. Mapa de actores del PMAA en El Bajo Cauca antioqueño.

Sector Servicios: El sector servicios por su parte se comprenderá como aquel que presta los servicios materiales no productores de bienes, que se ofrecen para satisfacer las necesidades de la población. Los actores sociales identificados en este sector incluyen: Aguascol y Operadores del Servicio de Aseo.

Es importante señalar que cada actor tiene un Rol en el PMAA, un **actor clave,** es aquel cuya participación es relevante en el desarrollo exitoso del proyecto por su papel en la subregión, o el ámbito de lo público; un **actor consultivo,** expresa su opinión para el desarrollo, por ser experto en un tema, por su rol social, o porque el Plan pueda generar algún impacto en él; finalmente un **actor con impacto potencial,** es importante porque su actividad productiva impacta o puede impactar significativamente en el recurso hídrico subterráneo.

Con el PMAA, como punto de llegada a partir del diagnóstico, reuniendo elementos de los componentes físico y socioeconómico, y agregando las amenazas identificadas, se construyó el árbol de problemas (Figura 39). En la parte central del esquema se define como problema principal, la insostenibilidad del recurso hídrico subterráneo; debajo se identifican las amenazas agrupadas en cuatro grupos, y a continuación se detallan las causas de las mismas. En la parte superior se definen los efectos, en los que se identifica el aumento de las enfermedades de origen hídrico, la disminución de la disponibilidad del agua y su potencial uso, el aumento en los costos de la potabilización del agua y el deterioro de la calidad de los ecosistemas acuáticos asociados al acuífero. Se visualiza en este mapa como amenazas transversales -identificadas como causas de las demás- la débil gestión institucional y la débil gestión social y comunitaria.

Una vez construido el árbol de problemas, mediante ejercicios con actores y sectores, luego de reconocer el escenario actual, se proyectaron escenarios tendenciales y deseados para concertar luego un escenario posible, producto del cual se construyó un árbol de escenarios (Figura 40), en el cual se busca invertir y lograr una imagen en positivo de cada uno de los problemas identificados, en el que el problema global reconocido, deberá transformarse en un: “Avanzar hacia la recuperación de la calidad y cantidad del agua del acuífero a través de una gestión conjunta entre las autoridades ambientales y las comunidades, lo cual también contribuye a recuperar la calidad de las aguas de los ríos y ciénagas, su fauna y vegetación acuática”.

A partir de la imagen en positivo, se definen los objetivos, líneas estratégicas de acción, programas y proyectos del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos de El Bajo Cauca antioqueño, el cual es la herramienta de planificación mediante la cual CORANTIOQUIA promoverá la gestión del recurso hídrico subterráneo en esta subregión, en un horizonte de Planeación de 10 años. La formulación del PMAA busca definir e implementar unos Instrumentos de Planificación y Acciones de Manejo que sean técnicamente factibles, económicamente viables, socialmente aceptados y que correspondan a las amenazas o problemas encontrados y a la imagen objetiva definida en la prospectiva, y que además, garanticen la sostenibilidad del recurso en términos de calidad y cantidad. En la Tabla 8, se resume el porvenir del PMAA.

Ahora corresponde esperar y actuar, con la expectativa que: i) con la apropiación del conocimiento, ii) con el compromiso social, y iii) bajo la orientación de las entidades del Estado que tienen la misión de velar por el bienestar de la comunidad y de los bienes que la naturalezas le brinda para hacer posible una vida con calidad, sea posible garantizar el que en el porvenir se contará con agua y especialmente con agua subterránea en El Bajo Cauca antioqueño.

“El futuro no es lo que va a pasar, sino lo que vamos a hacer”, son las sabias palabras de un poeta que vivía en la realidad.

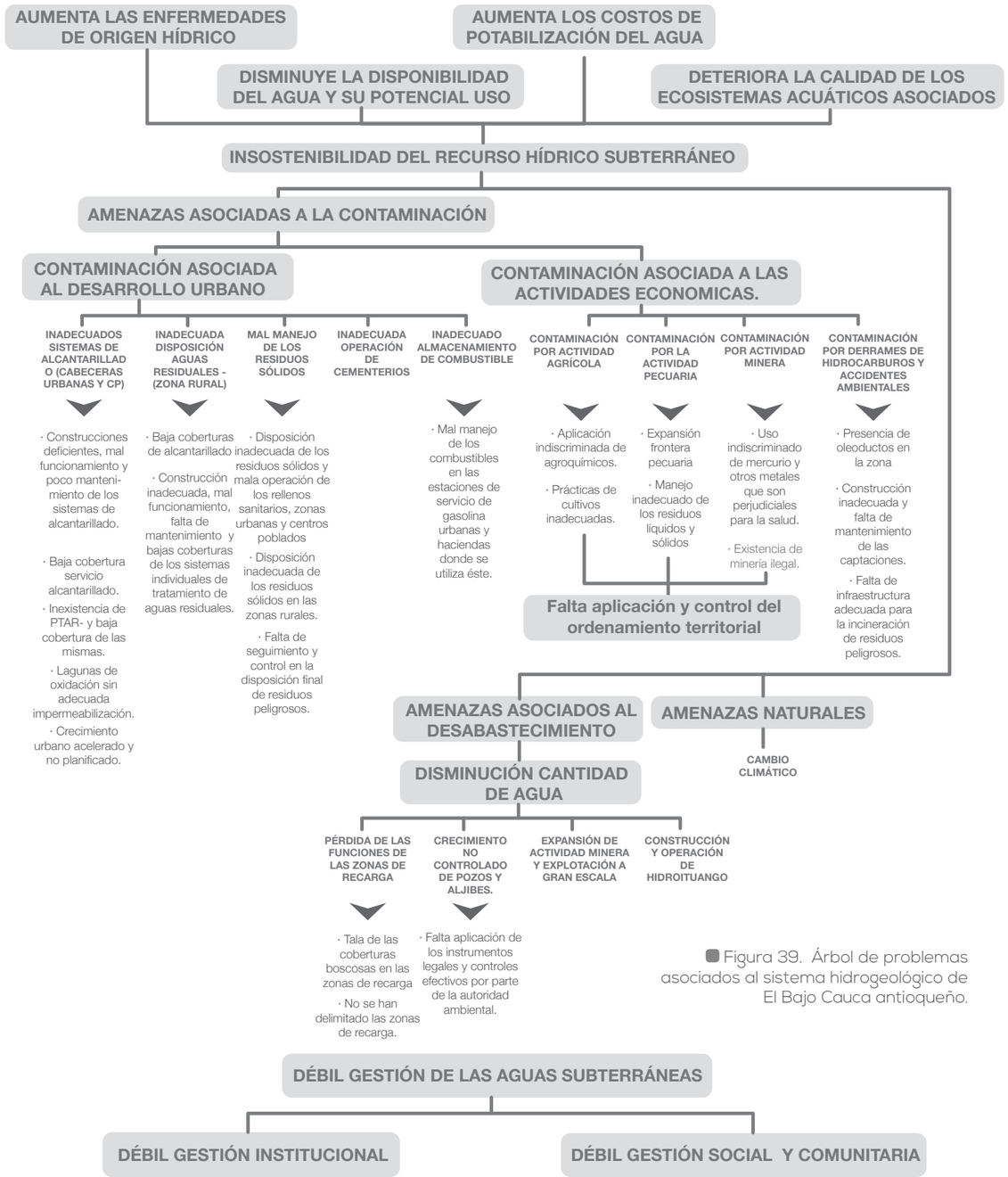

AUMENTA LAS ENFERMEDADES DE ORIGEN HÍDRICO
AUMENTA LOS COSTOS DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA
DISMINUYE LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA Y SU POTENCIAL USO
DETERIORA LA CALIDAD DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS ASOCIADOS
INSOSTENIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO
AMENAZAS ASOCIADAS A LA CONTAMINACIÓN
CONTAMINACIÓN ASOCIADA AL DESARROLLO URBANO
CONTAMINACIÓN ASOCIADA A LAS ACTIVIDADES ECONOMICAS.
INADECUADOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO (CABECERAS URBANAS Y CP)
· Construcciones deficientes, mal funcionamiento y poco mantenimiento de los sistemas de alcantarillado.
· Baja cobertura servicio alcantarillado.
· Inexistencia de PTAR- y baja cobertura de las mismas.
· Lagunas de oxidación sin adecuada impermeabilización.
· Crecimiento urbano acelerado y no planificado.
INADECUADA DISPOSICIÓN AGUAS RESIDUALES - (ZONA RURAL)
· Baja coberturas de alcantarillado
· Construcción inadecuada, mal funcionamiento, falta de mantenimiento y bajas coberturas de los sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales.
MAL MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS
· Disposición inadecuada de los residuos sólidos y mala operación de los rellenos sanitarios, zonas urbanas y centros poblados
· Disposición inadecuada de los residuos sólidos en las zonas rurales.
· Falta de seguimiento y control en la disposición final de residuos peligrosos.
INADECUADA OPERACIÓN DE CEMENTERIOS
INADECUADO ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE
· Mal manejo de los combustibles en las estaciones de servicio de gasolina urbanas y haciendas donde se utiliza éste.
CONTAMINACIÓN POR ACTIVIDAD AGRÍCOLA
· Aplicación indiscriminada de agroquímicos.
· Prácticas de cultivos inadecuadas.
CONTAMINACIÓN POR LA ACTIVIDAD PECUARIA
· Expansión frontera pecuaria
· Manejo inadecuado de los residuos líquidos y sólidos
CONTAMINACIÓN POR ACTIVIDAD MINERA
· Uso indiscriminado de mercurio y otros metales que son perjudiciales para la salud.
· Existencia de minería ilegal.
CONTAMINACIÓN POR DERRAMES DE HIDROCARBUROS Y ACCIDENTES AMBIENTALES
· Presencia de oleoductos en la zona
· Construcción inadecuada y falta de mantenimiento de las captaciones.
· Falta de infraestructura adecuada para la incineración de residuos peligrosos.
Falta aplicación y control del ordenamiento territorial
AMENAZAS ASOCIADOS AL DESABASTECIMIENTO
AMENAZAS NATURALES
CAMBIO CLIMÁTICO
DISMINUCIÓN CANTIDAD DE AGUA
PÉRDIDA DE LAS FUNCIONES DE LAS ZONAS DE RECARGA
· Tala de las coberturas boscosas en las zonas de recarga
· No se han delimitado las zonas de recarga.
CRECIMIENTO NO CONTROLADO DE POZOS Y ALJIBES.
· Falta aplicación de los instrumentos legales y controles efectivos por parte de la autoridad ambiental.
EXPANSIÓN DE ACTIVIDAD MINERA Y EXPLOTACIÓN A GRAN ESCALA
CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE HIDROITUANGO
DÉBIL GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DÉBIL GESTIÓN INSTITUCIONAL
DÉBIL GESTIÓN SOCIAL Y COMUNITARIA

Figura 39. Árbol de problemas asociados al sistema hidrogeológico de El Bajo Cauca antioqueño.

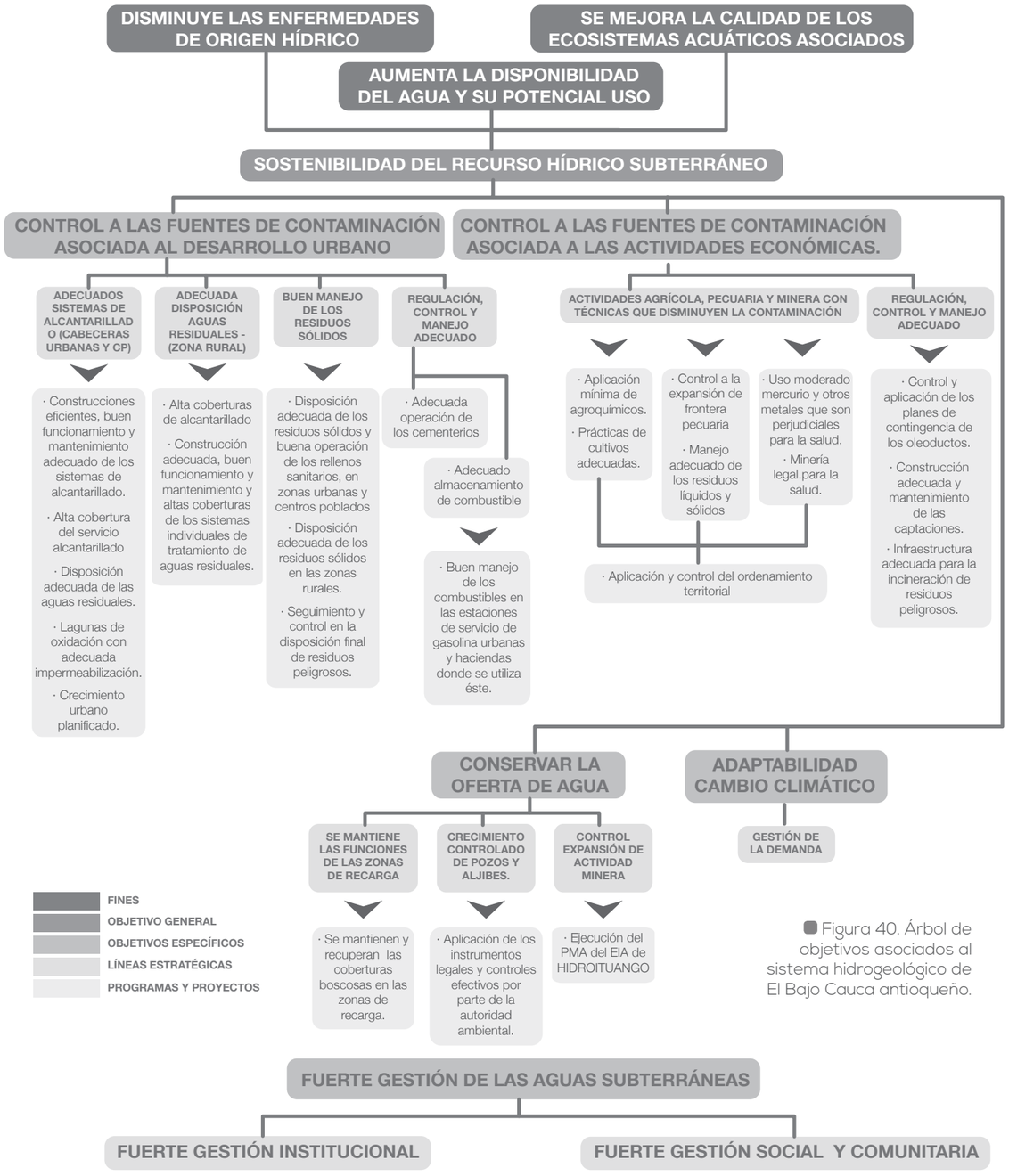

DISMINUYE LAS ENFERMEDADES DE ORIGEN HÍDRICO
SE MEJORA LA CALIDAD DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS ASOCIADOS
AUMENTA LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA Y SU POTENCIAL USO
SOSTENIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO
CONTROL A LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN ASOCIADA AL DESARROLLO URBANO
CONTROL A LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN ASOCIADA A LAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS.
ADECUADOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO (CABECERAS URBANAS Y CP)
· Construcciones eficientes, buen funcionamiento y mantenimiento adecuado de los sistemas de alcantarillado.
· Alta cobertura del servicio alcantarillado
· Disposición adecuada de las aguas residuales.
· Lagunas de oxidación con adecuada impermeabilización.
· Crecimiento urbano planificado.
ADECUADA DISPOSICIÓN AGUAS RESIDUALES - (ZONA RURAL)
· Alta coberturas de alcantarillado
· Construcción adecuada, buen funcionamiento y mantenimiento y altas coberturas de los sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales.
BUEN MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS
· Disposición adecuada de los residuos sólidos y buena operación de los rellenos sanitarios, en zonas urbanas y centros poblados
· Disposición adecuada de los residuos sólidos en las zonas rurales.
· Seguimiento y control en la disposición final de residuos peligrosos.
REGULACIÓN, CONTROL Y MANEJO ADECUADO
· Adecuada operación de los cementerios
· Adecuado almacenamiento de combustible
· Buen manejo de los combustibles en las estaciones de servicio de gasolina urbanas y haciendas donde se utiliza éste.
ACTIVIDADES AGRÍCOLA, PECUARIA Y MINERA CON TÉCNICAS QUE DISMINUYEN LA CONTAMINACIÓN
· Aplicación mínima de agroquímicos.
· Prácticas de cultivos adecuadas.
· Control a la expansión de frontera pecuaria
· Manejo adecuado de los residuos líquidos y sólidos
· Uso moderado mercurio y otros metales que son perjudiciales para la salud.
· Minería legal.para la salud.
· Aplicación y control del ordenamiento territorial
REGULACIÓN, CONTROL Y MANEJO ADECUADO
· Control y aplicación de los planes de contingencia de los oleoductos.
· Construcción adecuada y mantenimiento de las captaciones.
· Infraestructura adecuada para la incineración de residuos peligrosos.
CONSERVAR LA OFERTA DE AGUA
ADAPTABILIDAD CAMBIO CLIMÁTICO
SE MANTIENE LAS FUNCIONES DE LAS ZONAS DE RECARGA
· Se mantienen y recuperan las coberturas boscosas en las zonas de recarga.
CRECIMIENTO CONTROLADO DE POZOS Y ALJIBES.
· Aplicación de los instrumentos legales y controles efectivos por parte de la autoridad ambiental.
CONTROL EXPANSIÓN DE ACTIVIDAD MINERA
· Ejecución del PMA del EIA de HIDROITUANGO
GESTIÓN DE LA DEMANDA
FINES
OBJETIVO GENERAL
OBJETIVOS ESPECÍFICOS
LÍNEAS ESTRATÉGICAS
PROGRAMAS Y PROYECTOS
FUERTE GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
FUERTE GESTIÓN INSTITUCIONAL
FUERTE GESTIÓN SOCIAL Y COMUNITARIA

Figura 40. Árbol de objetivos asociados al sistema hidrogeológico de El Bajo Cauca antioqueño.

Tabla 8. El futuro de la Planeación para el Manejo del Acuífero en El Bajo Cauca.

Objetivos Específicos	Líneas Estratégicas de Acción	Acciones de Manejo	
		Programas	Proyectos
Disminuir el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero de El Bajo Cauca antioqueño mediante el control de las fuentes de contaminación originadas por el desarrollo urbano y actividades económicas.	Apoyo, cooperación y acompañamiento a los municipios en el saneamiento ambiental de sus asentamientos.	Saneamiento básico urbano.	Proyecto 1. Cooperación y articulación en la ejecución de los instrumentos de planificación para el manejo de aguas residuales (Planes Maestros de Acueducto y Alcantarillado, Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos y Plan Departamental de Aguas).
			Proyecto 2. Cooperación y apoyo a los municipios de la Territorial Panzenú en la gestión integral de los residuos sólidos ordinarios, peligrosos y especiales.
		Plan de saneamiento básico rural.	Proyecto 3: Construcción de unidades individuales de tratamiento de aguas residuales con énfasis en las zonas de recarga acuífero.
			Proyecto 4: Programa para el manejo adecuado de los residuos sólidos en las zonas rurales de la Territorial Panzenú.
	Regulación y control a los vertimientos y uso del agua en las actividades económicas y el desarrollo urbano (Autoridad Ambiental).	Programa de control y seguimiento a las fuentes de contaminación identificadas.	Proyecto 5. Creación de un grupo interdisciplinario e interinstitucional para el control y seguimiento a las fuentes de contaminación generados por las diferentes actividades económicas.
			Proyecto 6. Seguimiento y control a los vertimientos de las cabeceras urbanas y centros poblados (Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos y tasas retributivas)
		Control de captaciones activas y abandonadas.	Proyecto 7. Inventario, seguimiento y control a la construcción de captaciones y capacitación en el manejo de las existentes.
	Fomento Producción más Limpia.	Inclusión de prácticas sostenibles en los procesos productivos.	Proyecto 8. Inclusión de prácticas sostenibles en la producción agropecuaria e incentivos.
			Proyecto 9. Legalización y organización de la pequeña y mediana minería e inclusión de prácticas sostenibles.
			Proyecto 10. Capacitación en el manejo y almacenamiento de combustibles y aceites.
Disminuir el riesgo por desabastecimiento a partir del control a las amenazas que afectan la oferta.	Gestión de la oferta del recurso hídrico subterráneo.	Protección de las zonas de recarga	Proyecto 11. Delimitación de las zonas de recarga del acuífero, reglamentación de sus usos y definición de las medidas de manejo.
		Protección de ecosistemas asociados y dependientes al sistema de acuíferos	Proyecto 12. Evaluación de la interacción humedales y agua subterránea incluyendo escenarios de cambio ambiental.
			Proyecto 13. Evaluación de la interacción ríos y agua subterránea incluyendo escenarios de cambio ambiental
Caracterizar, cuantificar y gestionar la demanda como acciones encaminadas a prevenir efectos del cambio global.	Gestión de la demanda del recurso hídrico subterráneo.	Estudio de la relación oferta demanda.	Proyecto 14. Caracterización e inventario demanda, estimación oferta y balance oferta – demanda.
		Manejo integral de la demanda.	Proyecto 15. Reglamentación de los usos del agua (legalización captaciones) y seguimiento a los consumos del agua en los diferentes usos.
			Proyecto 16. Plan de uso eficiente y ahorro del agua.
		Manejo del riesgo por el cambio global	Proyecto 17. Evaluación de riesgo por cambio ambiental y definición de las medidas de adaptación al mismo.
Fortalecer la gestión institucional y social del recurso hídrico subterráneo.	Generación de instrumentos y herramientas para el fortalecimiento institucional	Cooperación y coordinación interinstitucional.	Proyecto 18. Conformación y consolidación de la mesa ambiental para la ejecución, control, seguimientos y ajustes al PMAA.
			Proyecto 19. Articulación PMAA con los instrumentos de planificación del orden regional y local.
		Investigación como soporte de la gestión del recurso.	Proyecto 20. Identificación y valoración de las funciones, bienes y servicios ambientales de las aguas subterráneas de El Bajo Cauca antioqueño.
			Proyecto 21. Actualización y ajustes al modelo conceptual del sistema acuífero de El Bajo Cauca antioqueño.
		Fortalecimiento Institucional	Proyecto 22. Creación de una unidad técnica para la gestión del recurso hídrico subterráneo en la Territorial Panzenú.
	Generación de instrumentos y herramientas para el fortalecimiento social.	Educación ambiental: hacia una cultura del agua.	Proyecto 23. Educación para el manejo y uso adecuado del recurso y difusión del conocimiento.
			Proyecto 24. Fortalecimiento a los PRAES de las instituciones educativas con el tema del agua subterránea.
		Fortalecimiento a las organizaciones comunitarias para la buena gestión del agua subterránea	Proyecto 25. Capacitación y cualificación de las organizaciones comunitarias y líderes sociales para la buena gestión del agua subterránea.
			Proyecto 26. Fortalecimiento a la Veeduría ambiental en Gestión de las aguas subterráneas.
			Proyecto 27. Consolidación de una red de organizaciones ambientales entorno a la gestión de las aguas subterráneas.

BIBLIOGRAFÍA

7

Alcaldía de Cáceres. (2012). Plan de Desarrollo Municipal “De la Mano con el Pueblo” 2012-2015, Municipio de Cáceres.

Alcaldía de Caucasia. (2012). Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015, Municipio de Caucasia.

Alcaldía de El Bagre. (2012). Plan de Desarrollo Municipal “De Palabras, Gestión Y Hechos” (2012 - 2015), Municipio de El Bagre.

Alcaldía de Nechí. (2012). Plan de Desarrollo Nechi 2012-2015, Municipio de Nechí.

Alcaldía de Tarazá. (2012). Plan de Desarrollo 2012-2015 “Desarrollo económico con equidad social”, Municipio de Tarazá.

Appelo, C., y Postma, D. (1999). Variable dispersivity in a column experiment containing MnO and FeOOH-coated sand. Journal of Contaminant Hydrology, 40 (1), 95-106.

Betancur, T. (2008). Una aproximación al conocimiento de un sistema de acuífero tropical. Caso de estudio: el Bajo Cauca antioqueño.Trabajo de tesis para optar por el titulo de Doctora en Ingeniería. Universidad de Antioquia, Medellín.

Betancur, T., Mejía, O., y Palacio, C. (2010). La modelación numérica como herramienta para entender la interacción humedal - agua subterránea. Caso de estudio: Zona de captura de Ciénaga Colombia. Revista Latino-Americana de hidrogeología, 7(1), 55-62.

Bredehoeft, J. (2005). The conceptualization model problem-surprise. Hydrogeology journal, 13 (1), 37-46.

Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hidalgo, J., y Slooten, L. (2005). Inverse problem in hydrogeology. Hydrogeology Journal, 13 (1), 206-222.

Chow, V., Maidment, D. y Mays , L., (1994). Hidrología Aplicada. Traducido de la primera edición en inglés: Applied Hydrology, McGraw-Hill.

CORANTIOQUIA. (1996). Acuerdo N° 17: Reserva de Recursos Naturales de la Zona Ribereña del Río Cáuca en el territorio antioqueño. Concejo Directivo. Medellín, Colombia.

CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia. (2003). Evaluación Hidrogeológica entre los Municipios de Caucasia y Cáceres. Informe final del convenio Interinstitucional 1201. Medellín, Colombia.

CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia. (2004). Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos al norte del municipio de Caucasia. Medellín: Informe final del convenio interinstitucional 5119.

CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia. (2005). Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos en la cuenca del Río Cacerí. Medellín: Informe final del convenio interinstitucional 5691.

CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia. (2011). Plan de manejo ambiental de Acuíferos-PMAA-Fase I-Dirección Territorial Panzenú. Informe final del contrato 8823 de 2010. Medellín.

CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia. (2014). Plan de manejo ambiental de Acuíferos-PMAA-Fase II-Dirección Territorial Panzenú. Informe final del contrato 964 de 2013. Medellín.

Córdoba, M. N. (2011). Territorio Corantioquia: Atlas Geográfico. Medellín. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, CORANTIOQUIA.

Custodio, E., y Llamas, M. R. (1997). Hidrología subterránea. Barcelona: Omega Editores.

DANE. (2005). http://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion. Recuperado el 3 de Agaosto de 2013.

Escobar, J. F. (2011). Plataforma SIG para la modelación de Sistemas Acuíferos. Trabajo de tesis para optar por el titulo de Doctor en Ingeniería. Universidad de Antioquia, Medellín.

Falkenmark, M., y Chapman, T. (1989). Comparative Hydrology: an ecological approach to land and water resources. Unesco.

Foster, S., y Hirata, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO HPE-CEPIS Technical Manual. CEPIS. Lima, Perú.

Foster, S., y Ricardo, H. (1991). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Programa Regional de Prevención y Control de la Contaminación de Aguas Subterráneas. CEPIS. Lima, Perú.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D’elia, M., y Paris, M. (2002). Protección de la calidad del agua subterránea: Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial. Washington, D.C.

Gaviria, J. I. (2005). Identificación y clasificación de fuentes potenciales de contaminación del acuífero libre del Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Sanitario, Universidad de Antioquia, Medellín.

Gaviria, J. I. (2010). Desarrollo y aplicación de una metodología para evaluar el riesgo a la contaminación de las aguas en un acuífero libre, caso de estudio: cuenca baja del río Man, Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de tesis para optar al título de Magister en Ingeniería, Universidad de Antioquia , Medellín.

Gobernación de Antioquia. (2009a). Perfil de la Subregión del Bajo Cauca. Antioquia para todos, Manos a la obra. Dirección de Planeación Estratégica Integral. Medellín, Colombia.

Gobernación de Antioquia. (2009b). Anuario Estadístico de Antioquia. Departamento Administrativo de Planeación, Dirección de Sistemas de Indicadores. Medellín, Colombia.

Goméz, A. M. (2010). Propuesta metodológica para la generación de un modelo hidrológico conceptual: aplicación a la cuenca del Río Man (Bajo Cauca antioqueño). Trabajo de tesis para optar al título de Magister en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín.

González, H. (1996). Mapa geológico del departamento de Antioquia. Memoria explicativa. INGEOMINAS.

González, H., y Londoño, C. (2001). Mapa geológico del depatamento de Córdoba. Memoria explicativa. INGEOMINAS.

López Geta, J. A., Fornés, J. M., Ramos, G. y Villaroya, F., 1999. Las Aguas Subterráneas: Un recurso natural del subsuelo. 1 ed. Madrid: Grupo industrial de Artes Gráficas.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2012). Decreto 1640 de 2012 por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos. Bogotá.

Montoya, D. (2010). Modelo conceptual y numérico del sistema hidrológico Ciénaga Colombia Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín.

Montoya, D., y Gaviria J, I. (2011). Las aguas subterráneas un recurso vital para la sostenibilidad. Medellín.

Municipio de Tarazá. (2008). Plan Territorial de Salud 2008 - 2011. Municipio de Tarazá.

Nguyet, V., y Goldscheider, N. (2006). Hydrogeological characterization and groundwater protection of tropical mountainous Karst Areas in NW Vietnam. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel.

Palacio, P. (2014). Modelo hidrológico conceptual para la cuenca del río Man a partir de técnicas hidrológicas, hidrogeoquímicas e isotópicas. Trabajo de tesis para optar al título de Doctora en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín.

Pernía, J., y Fornés, J. (2008). Cambio Climático y Aguas Subterráneas, Visión para los próximos decenios. Instituto Geológico y Minero de España.

Presidencia de la República. (2008). Constitución Política de Colombia. Recuperado el 20 de diciembre de 2013, de http://web.presidencia.gov.co/constitucion/index.pdf.

Ribeiro, L., Betancur, T., & D'elia, M. (2012). Red AQUIFERURAL: Metodologías de análisis y aplicación de tecnologías para el manejo sostenible de acuíferos en zonas rurales. Acuíferos rurales en Iberoamérica: Argentina, Chile, Colombia, Nicaragua, Portugual.

Rueda, O., y Betancur, T. (2006). Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en El Bajo Cauca antioqueño. Revista Avances en Recursos Hidráulicos, 13 (1), 71-88.

Santa, D. (2010). Identificación de interacciones hidrológicas entre el humedal Ciénaga Colombia y el acuífero libre del Bajo Cauca antioqueño mediante la utilización de técnicas hidroquímicas. Trabajo de tesis para optar al título de Magister en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín.

Shimanko, I. (1997). Comprenhensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm Environment Institute. Stockholm: Karin Hultcrantz.

Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2003). Science Earth. Illinois Central College. Edición N° 12.

Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: Causas, procesos y manifestaciones. Boletín geológico y minero, 111 (4), 9-26.

Universidad de Antioquia. (2007). Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca antioqueño.Informe de avances del contrato 14031 con el Organismo Internacional de Energía Atómica. Medellín, Colombia.

Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists–International Contributions to Hydrogeology, 16, 1-131.

Zapata, G., & Cossio, U. (1993). Geología de la plancha 93. Tarazá. INGEOMINAS.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

CORANTIOQUIA

ACTÚA

MinAmbiente
Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sostenible